



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
Ano 2013

**Ricardo Jorge Lucas
Vaz Cruz**

**Utilização da Energia Térmica do Solo para
Climatização de Edifícios**



**Ricardo Jorge Lucas
Vaz Cruz**

**Utilização da Energia Térmica do Solo para
Climatização de Edifícios**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Engenheiro José Alberto Marques Lapa, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais, irmão e namorada.

o júri

presidente

Professor Doutor Aníbal Guimarães da Costa

professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

arguente - principal

Professora Doutora Sofia Maria Mesquita Soares

professora adjunta da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja

vogal - orientador

Professor Doutor José Claudino de Pinho Cardoso

professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

vogal - coorientador

Professor José Alberto Marques Lapa

professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Os meus francos agradecimentos:

Aos meus orientadores, Professor Claudino Cardoso e Professor Marques Lapa, em especial ao segundo, pelo acompanhamento e apoio dado. A experiência e os ensinamentos dos dois foram fundamentais na elaboração desta dissertação.

Aos meus pais, António e Cândida Cruz, pelo constante e incansável apoio, pelos inúmeros sacrifícios e privações que tiveram que fazer ao longo do meu percurso académico. Sem eles teria sido impossível.

À minha namorada, Sofia Belga, porque sempre acreditou em mim e nunca me deixou desistir. O seu apoio, carinho e compreensão foram fundamentais para a realização desta etapa da minha vida.

Ao Alberto Almeida pela amizade incondicional.

palavras-chave

Geotermia, energia geotérmica de baixa entalpia, estruturas termo-ativas, transferências de temperatura, dinâmica de fluídos computacional.

resumo

A elevada dependência dos combustíveis fósseis atingiu um estado de consumo desmedido e insustentável, despertando na sociedade uma enorme preocupação com a situação energética mundial. Nos últimos tempos têm surgido várias alternativas de produção de energia através de fontes renováveis. Atualmente o setor da climatização de edifícios é dos que mais energia consome, e portanto têm emergido soluções muito interessantes.

Neste contexto surge a energia geotérmica de muito baixa entalpia. O aproveitamento da temperatura do solo a baixa profundidade tem revelado ser uma fonte de energia térmica muito estável e que pode ser aproveitada para climatização de edifícios. A solução criada para fazer o aproveitamento das temperaturas, praticamente constantes, do solo está em utilizar os elementos enterrados (fundações e muros) dos edifícios para extrair ou introduzir energia térmica ao solo. Esta é já uma prática muito utilizada em países da Europa Central, como por exemplo, a Alemanha, Áustria e Suíça, e nos últimos quatro anos, em franco desenvolvimento em Espanha. No nosso país, o cenário é ainda de insipiente conhecimento embora as necessidades energéticas do país sejam a mola impulsadora desta tecnologia, estando algumas entidades universitárias interessadas no desenvolvimento científico e tecnológico e principalmente as entidades públicas (ADENE, DGEG e LNEG) na sua maior utilização.

Esta dissertação deseja contribuir para a divulgação da energia geotérmica de baixa entalpia como uma alternativa para a climatização de edifícios. Para além disso, pretende-se criar um modelo numérico simples que ajude no estudo das transferências térmicas entre o solo e as fundações dos edifícios.

keywords

geothermal, low depth geothermal energy, thermal active structures, heat transfer, computational fluid dynamics.

abstract

The dependency on fossil fuels has risen to a state of unsustainable and incontrollable consumption, moving society to an increasing concern with world's energy condition. Recent times have brought several alternatives for energy generation through renewable sources. Today the building acclimatization sector is among those with the highest rate of energy consumption, which has led to the development of some interesting solutions.

Thus we reach to very low enthalpy geothermal energy. Exploiting soil temperature at shallow depths has revealed itself as a very stable source for thermal energy that can be used for building acclimatization. The created method for harnessing the soil's temperatures, practically invariable, relies on the use of the building's foundations to extract or introduce thermal energy into the ground. This is already common practice in countries of Central Europe, as Germany, Austria and Switzerland and in the last four years, in rapidly developing in Spain. In our country, the scenario is still incipient knowledge although the country's energy needs are driving this spring technology, and some academic institutions interested in scientific and technological development and above all public authorities (ADENE, DGEG and LNEG) in its increased use.

This dissertation wishes to contribute to the promotion of very low enthalpy geothermal energy as an alternative for building acclimatization. Furthermore, it's intended to design a simple numerical method providing some assistance for the studies of thermal transfers between the soil and a building's foundations.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
ÍNDICE DE TABELAS.....	iii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
CAPÍTULO 2 – ENERGIA GEOTÉRMICA.....	7
2.1. Origem e definição.....	8
2.2. Breve história sobre a energia geotérmica.....	8
2.3. Tipos de energia geotérmica e principais aplicações.....	9
2.4. Energia Geotérmica de Muito Baixa Entalpia.....	10
2.4.1. Introdução.....	10
2.4.2. Funcionamento geral.....	12
2.4.3. Modos de captação.....	14
2.4.4. Principais permutadores do circuito primário.....	16
2.5. Exemplos de base efetuados em países da Europa Central.....	18
CAPÍTULO 3 – FACTORES QUE INFLUENCIAM O SISTEMA.....	19
3.1. Considerações gerais.....	20
3.2. Parâmetros geotécnicos.....	21
3.2.1. Tipo de solo.....	21
3.2.2. Condições freáticas.....	22
3.3. Principais propriedades térmicas do solo.....	22
3.3.1. Condutibilidade térmica.....	22
3.3.2. Difusividade térmica.....	23
3.3.3. Calor específico/ Capacidade calorífica.....	23
3.4. Transferências de temperatura no solo.....	24
3.4.1. Condução.....	25
3.4.2. Convecção.....	26
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE NUMÉRICA.....	29
4.1. Considerações gerais.....	30
4.2. Os programas utilizados.....	30
4.3. O modelo numérico.....	32
4.4. Fluent – Equações de base.....	37
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	41
5.1. Análise 1.....	42
5.2. Análise 2.....	46
5.3. Discussão de resultados.....	50
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
6.1. Conclusões e comentários.....	54
6.2. Propostas para futuros trabalhos.....	55
BIBLIOGRAFIA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Contribuição das energias renováveis para o consumo final de eletricidade [3].	3
Figura 2 – Principais aplicações da energia geotérmica em função da temperatura [5].	10
Figura 3 – Esquema do funcionamento geral de um sistema geotérmico [7].	12
Figura 4 – Funcionamento no Inverno (à esquerda). Funcionamento no Verão (à direita).	14
Figura 5 – Esquema de uma captação horizontal [12].	15
Figura 6 – Esquema de captação vertical através de um furo artesiano [12].	16
Figura 7 – Esquema de captação vertical através de estacas de fundação [13].	16
Figura 8 – Rede de tubagem inserida na armadura da estaca de fundação [9].	17
Figura 9 – Rede de tubagem inserida na armadura de um muro de contenção [9].	17
Figura 10 – Mecanismo de propagação do calor por condução [4].	25
Figura 11 – Mecanismo de propagação de calor por convecção [4].	27
Figura 12 – Ambiente de trabalho do <i>POINTWISE</i> .	31
Figura 13 – Ambiente de trabalho do <i>FLUENT</i> .	32
Figura 14 – Esquema geral do modelo adotado.	33
Figura 15 – Domínio e malha gerada para o solo.	35
Figura 16 – Domínio e malha gerada para as paredes.	35
Figura 17 – Condições fronteira definidas para o modelo.	37
Figura 18 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 2m.	43
Figura 19 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 5m.	44
Figura 20 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 10m.	45
Figura 21 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 25m.	46
Figura 22 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 2m.	47
Figura 23 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 5m.	48
Figura 24 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 10m.	48
Figura 25 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 25m.	49
Figura 26 – Pormenor da distribuição das temperaturas no topo das paredes.	49
Figura 27 – Dissipação da temperatura ao longo de uma estaca [34].	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores que influenciam o sistema.	20
Tabela 2 – Propriedades dos materiais utilizados.	34
Tabela 3 – Resumo dos casos de estudo elaborados.	42

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Aquecimento global. Efeito estufa. Poluição Ambiental.

Aumento dos preços da energia elétrica, dos combustíveis de origem fóssil e biomassa.

Diariamente somos confrontados com notícias sobre estas problemáticas. A dura realidade de que o nosso planeta está a degradar-se provoca inquietação em relação ao futuro. É tempo de repensar estratégias e de enveredar por outras soluções mais sustentáveis com garantias de futuro.

1.1. Enquadramento energético

A modernização e desenvolvimento da sociedade têm provocado uma dependência energética voraz nos últimos anos. Na União Europeia, calcula-se que esta dependência esteja nos 50% e que nos próximos 20 anos subirá 20 pontos percentuais. No nosso país, o cenário é ainda mais dramático. Embora Portugal tenha encetado nos últimos anos um significativo investimento para a produção de energia renovável, eólica, fotovoltaica e hidroelétrica, ainda importa aproximadamente 90% da energia que utiliza, e nos últimos 10 anos amplificou, em 35%, a sua dependência energética [1].

A União Europeia não ficou indiferente a este panorama energético, e em 2010 redigiu um documento, *Diretiva 2010/31/EU* [2], onde traça algumas metas importantes a serem alcançadas pelos países membros, das quais se destacam:

- Utilização moderada e consciente dos combustíveis fósseis e gás natural;
- Redução em 20% dos gases com efeito estufa até 2020;
- Busca de desempenhos energéticos eficientes com o objetivo, de até 2020, tornar as novas edificações autossuficientes.

Perante este cenário surge cada vez mais a ideia de que as energias renováveis são um recurso viável e com enorme potencial a ser explorado. Energias alternativas como a solar, eólica, e geotérmica são vistas como fulcrais para a sustentabilidade e eficiência energética.

Nos últimos anos, em Portugal, a aposta no setor das energias renováveis tem vindo a aumentar, embora ainda exista um longo e árduo caminho a percorrer para que a dependência dos combustíveis fósseis baixe drasticamente. No entanto, as fontes de energia alternativa começam já a dar o seu contributo para o consumo final de eletricidade (Figura 1).



Figura 1 – Contribuição das energias renováveis para o consumo final de eletricidade [3].

É neste contexto de pesquisa e desenvolvimento de soluções energéticas de futuro que emerge e ganha força a energia geotérmica como um meio para a climatização de edifícios.

1.2. Objetivos

Pretende-se com esta dissertação contribuir para o desenvolvimento, melhoramento e divulgação dos sistemas geotérmicos como fonte de energia renovável de muito interesse para a eficiência energética dos edifícios

De entre as diferentes possibilidades de investigação, nos múltiplos fatores que influenciam a solução e que serão sinteticamente abordados nesta dissertação, neste trabalho pretende-se simular as transferências de calor entre o solo e as estacas de betão armado, recorrendo a um programa de volumes finitos, *ANSYS FLUENT*, para desta forma se obter uma base científica de trabalho que permita desenvolver modelos para determinar a influência de múltiplos fatores envolvidos nesta transferência térmica e que valide e melhore o conhecimento empírico que ainda envolve esta área.

Para atingir o objetivo principal desta investigação existem etapas que são fundamentais e as quais se ambiciona que sejam atingidas. Essas etapas passam por:

1. Conhecer os princípios que determinam o comportamento térmico dos solos e dos recursos geotérmicos, bem como dos atuais sistemas de permutação com elementos estruturais e bases dos sistemas termo-ativos;
2. Desenvolver conhecimentos do atual estado da arte dos sistemas baseados na captação de energia do solo, especialmente através de estacas termo-ativas;
3. Identificar os fatores mais importantes (tipo de solo, condutibilidade do solo, condições freáticas, etc.) que influenciam o bom funcionamento dos sistemas;
4. Conseguir modelação da transferência térmica do solo para os permutadores através de elementos de betão armado das fundações.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, que revelam o desenvolver do trabalho efetuado, salientando os aspetos essenciais. Neste primeiro capítulo é dado a conhecer o enquadramento da tese, bem como os seus objetivos.

No capítulo 2 é introduzido o tema da geotermia com especial atenção na energia geotérmica de muito baixa entalpia e no funcionamento geral de um sistema geotérmico.

O capítulo 3 aborda os fatores que influenciam os sistemas geotérmicos, ou seja, pretende-se dar a conhecer quais as propriedades/características do solo que mais afetam o desempenho de todo o sistema.

O capítulo 4 apresenta o objetivo primordial desta dissertação. Aqui será dado a conhecer o modelo numérico concebido para o estudo das transferências de temperatura entre o solo e as estacas de betão armado. São, ainda, apresentadas as ferramentas de cálculo utilizadas para o efeito.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos a partir da análise numérica realizada. Aqui será feita uma discussão desses mesmos resultados.

O capítulo 6 expõe as conclusões e comentários que se revelaram pertinentes da elaboração desta dissertação. São feitas, ainda, algumas sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

ENERGIA GEOTÉRMICA

A Terra está longe de ser um enorme corpo inativo. Antes pelo contrário. Todo o calor que é criado e transferido no interior do nosso planeta controla uma série de processos geodinâmicos. Tais processos são responsáveis pela atividade sísmica, vulcânica, a formação de cordilheiras, o metamorfismo e a intrusão. Este calor interno terrestre tem as seguintes origens [4]:

- A desintegração de isótopos radioativos, sobretudo de urânio 235, urânio 238, tório 232 e potássio 40;
- O calor libertado há 4500 milhões de anos na formação da Terra;
- Os movimentos diferenciais entre o núcleo e o manto;
- A cristalização do núcleo externo (líquido).

2.1. Origem e definição

A energia térmica que lentamente percorre o interior da Terra até à superfície é denominada de energia geotérmica. Por definição, a energia geotérmica *“é a energia armazenada sob a forma de calor por debaixo da superfície sólida terrestre”*, [4]. Não servem para esta definição as massas de água superficiais, continentais e marinhas que contenham calor.

Um outro conceito a reter, e que é intrínseco à energia geotérmica, é o conceito de gradiente geotérmico. Este avalia, em função da profundidade, a variação de temperatura no interior da Terra e expressa-se em °C/km. A temperatura aumenta 3,3°C por cada 100 m de profundidade. Este é um valor médio para todo o planeta [4].

2.2. Breve história sobre a energia geotérmica

O ser humano sempre viu nas zonas vulcânicas um polo de atração devido à existência de fontes termais e fumarolas. Aqui podiam cozinhar os seus alimentos e banharem-se nas águas quentes. Exemplo disso foram os paleoíndios da América do Norte, há cerca de 10000 anos atrás, e as primeiras civilizações, 3500 anos antes de Cristo [4].

A energia geotérmica começou a ganhar cada vez mais aplicações, com os gregos e os romanos, especialmente com as tradicionais termas e banhos públicos. As termas de Caracala, em Roma, podiam acolher mais de 1500 pessoas. Depressa estas utilizações se propagaram por todo o império romano [4].

Seguiram-se séculos em que o Homem retirou proveito do calor vindo do interior da Terra, no entanto, sem nunca conseguir explorar bem o enorme potencial da energia geotérmica. É então, no séc. XIX, que se obtêm alguns progressos, muito devido ao melhor conhecimento do subsolo. Num bairro de Paris, Grenelle, é construído um furo artesiano para captação de água potável a 30°C. Este furo tinha 548 m de profundidade [4].

A civilização do séc. XX, cada vez mais moderna e necessitada de energia para se sustentar, provoca um aumento da utilização da energia geotérmica. Surgem inovações. É gerada energia elétrica a partir do calor vindo do interior da Terra [4].

Surge no ano de 1930, em Reiquejavique, Islândia, a primeira rede moderna de aquecimento urbano abastecida por energia geotérmica. Era um feito importante que levaria ao aparecimento de outras redes de aquecimento um pouco por todo o mundo [4].

Após a Segunda Grande Guerra, começam a aparecer as primeiras instalações com bomba de calor geotérmica, em habitações e edifícios escolares, como por exemplo, em 1948, na Universidade do Estado de Ohio nos E.U.A. [4].

Mas só nos anos 90 é que as bombas de calor geotérmicas conhecem um verdadeiro desenvolvimento. O aumento do preço do crude e as novas exigências ambientais contribuem em larga escala para esse desenvolvimento e para o aproveitamento da energia do subsolo, no entanto com o calor a ser aproveitado à superfície e com tubagens para a permutação energética não inseridas em elementos estruturais [4].

Eis que decorridos cerca de 20 anos se chega à situação atual, com a energia geotérmica aplicada na climatização de edifícios, utilizando a sua própria estrutura resistente, reconhecida já um pouco por todo o mundo, como uma fonte de energia alternativa eficaz e amiga do ambiente [4].

2.3. Tipos de energia geotérmica e principais aplicações

A energia geotérmica pode ser dividida em diferentes categorias, dependendo da temperatura a que é extraída, ou melhor, da sua entalpia.

Resumidamente a entalpia é *“a quantidade de energia térmica que um fluido, ou objeto, pode permutar com a sua envolvente. Expressa-se em kJ/kg ou kcal/kg.”* [4]

Assim, a energia geotérmica, é organizada segundo as seguintes categorias [5]:

- Alta entalpia (temperatura superior a 150°C);

- Baixa entalpia (temperatura entre 30°C e 90°C);
- Muito baixa entalpia (temperatura inferior a 30°C)

Diferentes autores definem categorias diferentes, conforme os intervalos de temperatura que são considerados. Para o propósito deste trabalho, o importante são as temperaturas inferiores a cerca de 40°C (maior amplitude do diferencial de temperatura entre o solo e a temperatura do ar exterior), ou seja, energia geotérmica de baixa ou muito baixa entalpia. A energia térmica extraída do subsolo pode ser aplicada a distintas atividades da sociedade. A Figura 2 mostra as principais aplicações do calor terrestre em função da temperatura.

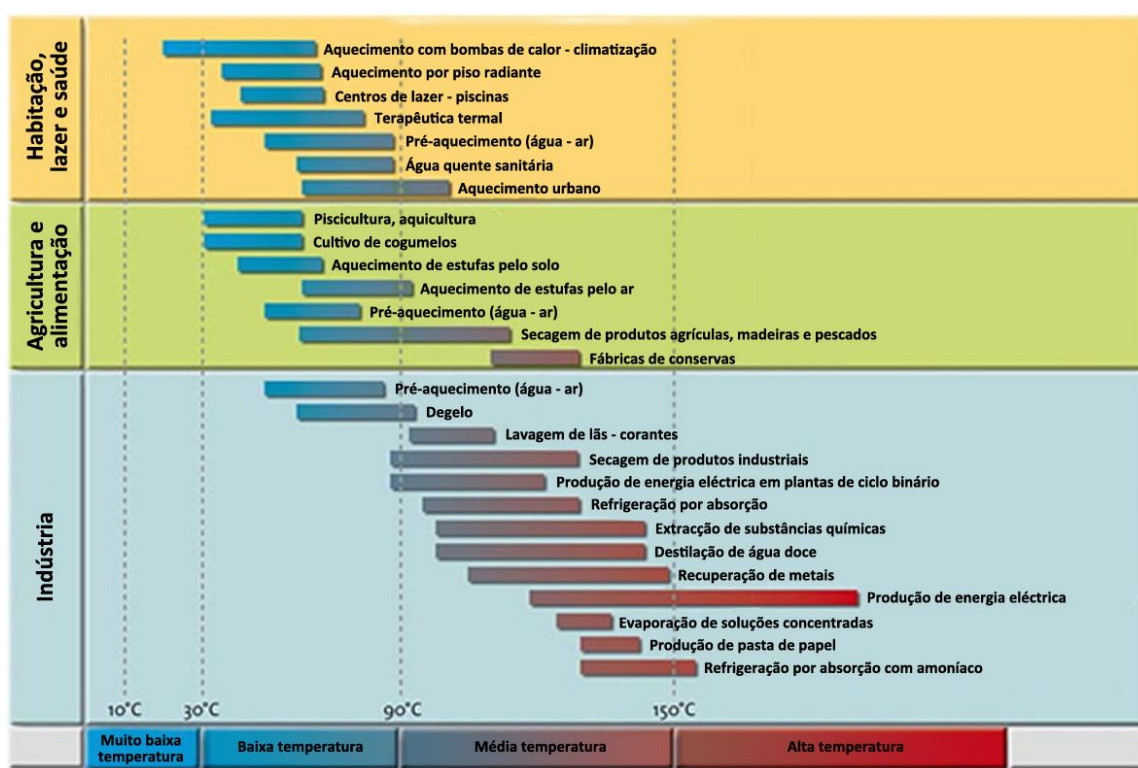


Figura 2 – Principais aplicações da energia geotérmica em função da temperatura [5].

2.4. Energia Geotérmica de Muito Baixa Entalpia

2.4.1. Introdução

Os sistemas geotérmicos tradicionais envolvem a exploração do calor da Terra a grandes profundidades, onde as temperaturas são bastante elevadas e facilmente se

consegue produzir energia elétrica. Contudo, estes sistemas são dispendiosos e a tecnologia envolvida só se justifica para projetos de grande dimensão [6] [7].

Estudos e projetos recentes têm revelado progressos incentivadores no âmbito dos sistemas geotérmicos superficiais, ou seja, para pequenas profundidades. O subsolo, mesmo a baixas profundidades, revela ser uma fonte de energia térmica muito estável, que pode ser aproveitada para benefício do conforto térmico do ser humano [7] [8]. É neste domínio que se encaixa a energia geotérmica de muito baixa entalpia.

A Europa, na sua grande maioria, apresenta solos com temperaturas aproximadamente constantes a profundidades entre os 10 m e os 15 m. A pouco mais de 50 m os valores rondam entre os 10°C e os 15°C. São temperaturas que, do ponto de vista da eficiência energética, podem ser utilizadas para a climatização dos edifícios [9].

A grande inovação da energia geotérmica de muito baixa entalpia está em usar as fundações dos edifícios para extrair energia térmica do solo, e com isso poder aquecer e arrefecer a superestrutura em contacto com o ar ambiente interior do edifício. Este tipo de estrutura denomina-se de termo-ativa.

Esta solução tecnológica é vulgarmente aplicada em fundações profundas (estacas), que por atingirem profundidades maiores relativamente a outro tipo de fundações, tiram melhor proveito do calor do subsolo [9]. Por se inserirem os permutadores de temperatura nesses elementos a construir, o custo da solução na parte da aquisição térmica é muito diminuto em comparação com a realização de furos artesianos para colocação dos permutadores, incluindo o seu reforço e proteção.

Os subcapítulos seguintes pretendem apresentar os princípios científicos por detrás desta tecnologia na vertente de fundações profundas. O funcionamento geral, o comportamento térmico do solo e a interação entre as estacas de fundação e o solo, são aqui abordados.

2.4.2. Funcionamento geral

Nos sistemas de utilização do solo para climatização de edifícios usa-se uma rede de tubagens embebidas nos elementos estruturais, particularmente de betão armado, que se ligam a uma bomba de calor. Nas tubagens circula água, com ou sem aditivos refrigeradores, que recebe a temperatura do solo por permuta com os elementos de fundação, e que posteriormente possibilita o aquecimento e arrefecimento do edifício através dos elementos da superestrutura [9].

Habitualmente, estes sistemas são divididos em 3 componentes principais [9]: circuito primário, bomba de calor e circuito secundário.

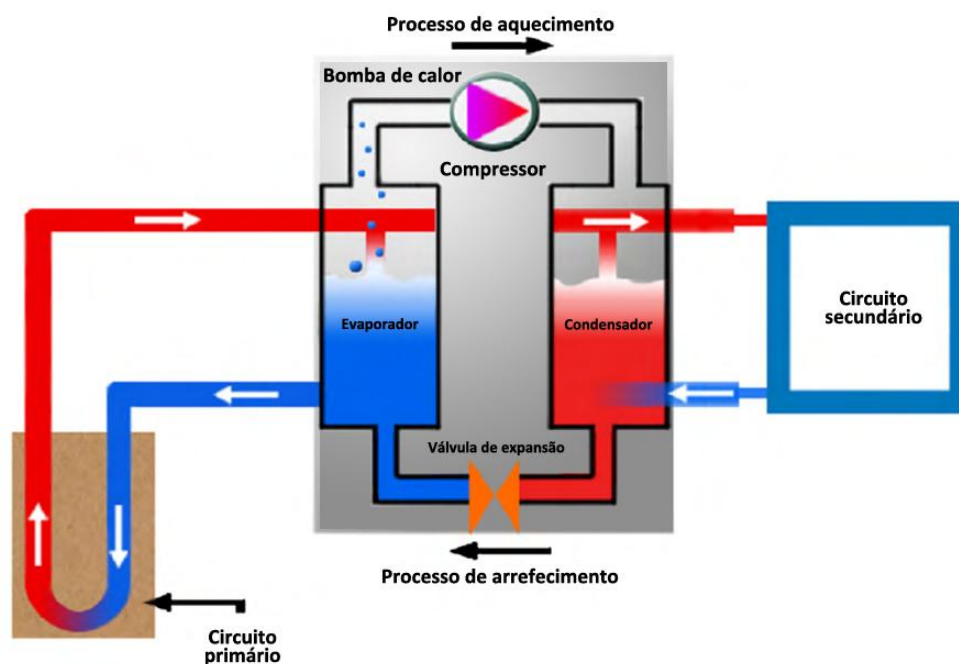


Figura 3 – Esquema do funcionamento geral de um sistema geotérmico [7].

Circuito primário

De forma genérica, o circuito primário é o que se encontra no subsolo. O circuito primário é essencialmente constituído pelos permutadores, sendo representados por elementos estruturais (fundações), solo envolvente e rede de tubagens. Através de mecanismos de convecção e condução são efetuadas trocas de calor entre o solo e as

fundações do edifício. Por sua vez, a energia térmica adquirida pela fundação é transmitida ao fluido que circula dentro das tubagens inseridas no betão armado. Este fluido, que é água, com ou sem anticongelante (glicol), ou uma mistura salina, circula com a ajuda de uma bomba de calor que faz a interligação entre o circuito primário e o circuito secundário [7] [9].

Bomba de calor

A bomba de calor é um dispositivo termodinâmico que funciona como um frigorífico mas em sentido inverso. Tem dois componentes básicos: o compressor e válvula de expansão. O compressor comprime o líquido refrigerante, elevando a temperatura e pressão, de modo a passar ao estado gasoso. De seguida, o calor gerado é levado para o circuito secundário, provocando um decréscimo de temperatura no líquido refrigerante. Aquando da passagem pela válvula de expansão, o gás expande e arrefece, voltando ao estado líquido. O ciclo repete-se [9] [10]. Resumindo, através do circuito primário a bomba extrai energia térmica ao solo. De seguida, potencia essa energia térmica e liberta-a para o edifício utilizando a rede hidráulica do circuito secundário.

Circuito secundário

O circuito secundário situa-se dentro do edifício, e consiste numa segunda rede de tubagens incluídas no interior das lajes e das paredes do edifício. O objetivo principal é usar a energia térmica captada no circuito primário para climatizar o edifício [7].

Funcionamento no verão

O funcionamento do sistema no verão pressupõe um arrefecimento da temperatura ambiente no interior do edifício, dado que este tem tendência para aquecer. O arrefecimento é feito através do circuito secundário que transmite o excesso de temperatura ao circuito primário, que por sua vez a transfere para o solo envolvente das fundações. No

fundo, o que se pretende dizer é que se retira a energia térmica que não é necessária à estrutura e dissipa-se essa mesma energia através do solo (Figura 4).

Funcionamento no inverno

O funcionamento no inverno é o oposto do funcionamento no verão. Aqui existem necessidades de aquecimento do edifício devido às temperaturas baixas do exterior. Este aquecimento é conseguido extraindo energia térmica ao solo através do circuito primário, que a transmite ao circuito secundário acabando por aquecer o edifício, quando o fluido das tubagens circula pela estrutura (Figura 4).



Figura 4 – Funcionamento no Inverno (à esquerda). Funcionamento no Verão (à direita).

2.4.3. Modos de captação

Nos sistemas geotérmicos de muito baixa entalpia existem dois modos de captação de energia térmica do solo: horizontal e vertical. Cada um destes modos tem as suas particularidades e exigências, e a opção, por um ou por outro, depende da solução final pretendida e das condicionantes do terreno [9].

Captação Horizontal

Este tipo de captação funciona em circuito hidráulico fechado. A rede de tubagem é instalada na horizontal em escavações junto ao local que se pretende climatizar. Os tubos são normalmente colocados em forma de “U” ou em forma helicoidal como mostra a Figura 5 [9] [11].

A grande vantagem deste tipo de sistemas reside no baixo custo de instalação e normalmente é usada em espaços com poucas exigências térmicas. A sua grande desvantagem está na extensão relativamente grande de terreno necessário. Uma outra desvantagem prende-se com as flutuações da temperatura do solo superficial [11].

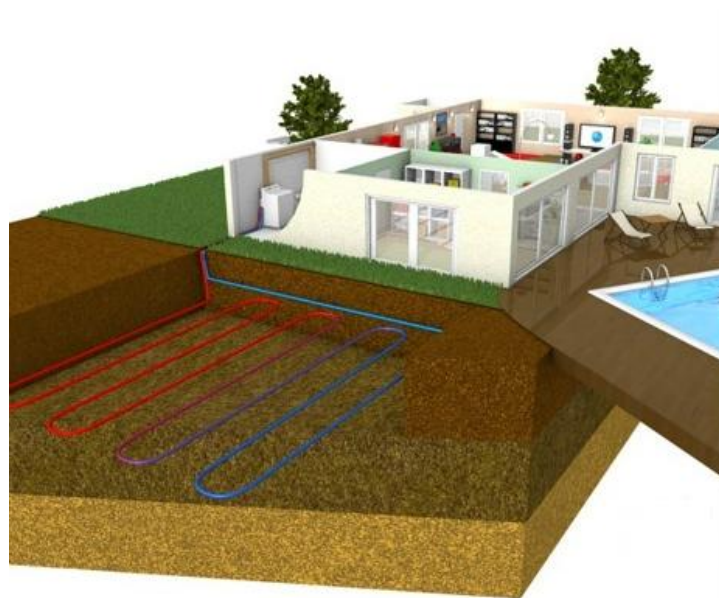


Figura 5 – Esquema de uma captação horizontal [12].

Captação Vertical

Tal como na captação horizontal este sistema também funciona em circuito fechado. A rede de tubagens pode ser inserida em elementos estruturais ou dentro de furos artesianos. A Figura 6 e Figura 7 mostram as duas formas de instalar o circuito hidráulico.

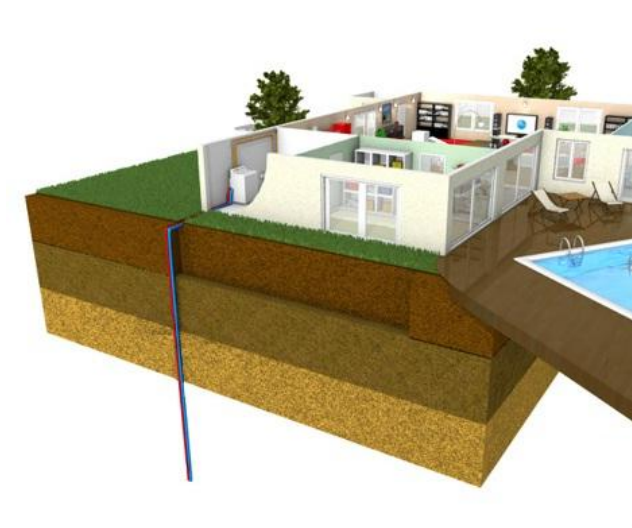


Figura 6 – Esquema de captação vertical através de um furo artesiano [12].



Figura 7 – Esquema de captação vertical através de estacas de fundação [13].

Os sistemas verticais são habitualmente preferidos devido às suas grandes vantagens, tais como:

- Menor área de terreno ocupado;
- Cumprimentos de tubo menores;
- Menores custos de operação com o sistema de bombagem;
- Temperaturas do solo mais estáveis.

2.4.4. Principais permutadores do circuito primário

Neste subcapítulo procura-se dar uma breve introdução aos permutadores que constituem o circuito primário. Apesar de já ter sido feita uma referência, em 2.4.2, julga-se necessário apresentar melhor estes elementos fundamentais do sistema de captação de energia térmica.

Genericamente pode-se dizer que existem dois tipos de permutadores utilizados na extração de energia térmica do solo: os elementos estruturais e os furos artesianos.

Os elementos estruturais que habitualmente fazem parte do circuito primário são as estacas de fundação (Figura 8). Outros elementos estruturais, como por exemplo, muros de contenção, paredes de caves e túneis são também um meio utilizado na permuta de temperatura com o solo [9] (Figura 9). As estacas de fundação pertencem ao grupo das fundações profundas que conseguem atingir zonas do solo com temperaturas mais elevadas e estáveis. Por essa razão são elementos preferenciais para a colocação da rede hidráulica do circuito primário. Como já foi explicado em 2.4.2, a rede de tubagem é embebida no betão armado, utilizado na construção da estaca (possui boas propriedades térmicas), permitindo a circulação de um fluido com ajuda de uma bomba de calor [9].



Figura 8 – Rede de tubagem inserida na armadura da estaca de fundação [9].



Figura 9 – Rede de tubagem inserida na armadura de um muro de contenção [9].

Os furos artesianos são o formato mais convencional da captação de calor do subsolo. São furos idênticos aos que são realizados para captação de água. O terreno é perfurado com profundidades entre os 20 m e 90 m, onde depois são inseridos um ou mais tubos em forma de “U”. As transferências de calor são realizadas diretamente entre os tubos e o solo, ou então através do material que preenche o furo [9] [11].

As tubagens incluídas nas estacas e nos furos artesianos funcionam, também, como se de um permutador se tratasse. Embora não façam transferências de temperatura diretas com o solo, acabam por transferir a temperatura para o fluido nelas contido. Estas tubagens são de polietileno de alta densidade (PEAD), que apresentam diâmetros de 20 mm ou 25 mm [9].

2.5. Exemplos de base efetuados em países da Europa Central

O presente subcapítulo pretende dar a conhecer a experiência adquirida por alguns países que utilizam o solo como fonte de calor para a climatização dos edifícios. Países como Áustria, Suíça e Alemanha são pioneiros nesta tecnologia e possuem já um desenvolvimento significativo nesta área.

Na Áustria duas obras admiráveis têm sido alvo de estudo. O túnel de Lainzer (ainda em construção) e a torre Uniq, ambos localizados em Viena. Na secção do túnel de Lainzer são utilizadas estacas para permutação de calor. Por cada 3 estacas construídas, uma tem tubagens inseridas no seu interior permitindo uma considerável extração de energia térmica para aquecimento e arrefecimento de várias estruturas envolventes ao túnel. A torre Uniq é fundada sobre um ensoleiramento com dois muros de contenção que atingem os 35 m de profundidade extraindo calor ao solo para as necessidades térmicas do edifício [14] [9].

Na Alemanha existem bons exemplos da aplicação da energia geotérmica de muito baixa entalpia em estacas de fundação. Um desses exemplos é a torre Frankfurt Main com 200 m de altura. Está assente em 213 estacas, das quais 112 são termo-ativas atingindo os 30 m de profundidade [15] [16]. Outro exemplo é o Centro Internacional de Energia Solar com 200 estacas para participar em 20% do aquecimento e 100% do arrefecimento necessário ao edifício [17].

Dentre estes 3 países considerados, a Suíça é o que mais experiência detém. A tecnologia é bastante usada em habitações unifamiliares através de permutadores inseridos em furos artesianos. Uma obra exemplar da utilização de estacas termo-ativas é o Aeroporto Dock Midfield em Zurique. Fundado em 400 estacas, 300 são usadas como permutadores de calor [15] [18]. Uma avaliação de desempenho mostrou que dos 2700 MWh/ano de exigências de aquecimento, 85% foram colmatadas pela solução adotada, e que dos 1200 MWh/ano de exigências de arrefecimento foram totalmente satisfeitos pela combinação de estacas termo-ativas com sistemas convencionais de arrefecimento [7].

Capítulo 3

FACTORES QUE INFLUENCIAM O SISTEMA

O capítulo anterior descreve o funcionamento do sistema em condições teóricas, ideais. A verdade é que existe uma variedade considerável de fatores que podem perturbar o funcionamento dos sistemas geotérmicos, e portanto, o conhecimento destes é um processo indispensável para o alcance do objetivo proposto.

3.1. Considerações gerais

A identificação dos fatores que influenciam os sistemas geotérmicos revela-se de extrema importância. O seu conhecimento permite avaliar de forma mais rigorosa a eficiência energética deste tipo de soluções. Estes fatores podem ser traduzidos por um conjunto de características/propriedades do solo e do betão armado, bem como os fenómenos de transferência de temperatura. Nem todos têm a mesma importância e influência, e portanto, pretende-se com este capítulo apresentar os que mais afetam o funcionamento das soluções geotérmicas.

Para melhor organização e compreensão foi feita uma subdivisão dos fatores em:

- Parâmetros geotécnicos;
- Principais propriedades térmicas do solo;
- Fenómenos de transferência de temperatura.

A tabela abaixo apresenta em jeito de resumo os fatores que contribuem para a eficiência energética dos sistemas.

Tabela 1 – Fatores que influenciam o sistema.

<i>FATORES QUE INFLUENCIAM O SISTEMA</i>		
<i>Propriedades térmicas do solo</i>	<i>Parâmetros geotécnicos</i>	<i>Fenómenos de transferência de calor</i>
Condutibilidade térmica; Difusividade térmica; Capacidade calorífica.	Tipo de solo; Nível freático; Densidade; Área de contacto solo-fundação; Percolação da água.	Condução; Convecção; Vaporização e condensação; Gelo-degelo; Troca de iões.

3.2. Parâmetros geotécnicos

Neste subcapítulo apresentam-se os parâmetros geotécnicos do solo que, de acordo com a pesquisa bibliográfica, evidenciam maior importância para os sistemas geotérmicos de muito baixa entalpia.

3.2.1. Tipo de solo

De forma muito simples explica-se a formação de solos como o resultado da decomposição física e química de rochas, podendo conter na sua composição matéria orgânica. Na constituição dos solos existem espaços entre as partículas, poros, que podem ser preenchidos por água e/ou ar. Assim sendo, o solo é um sistema de três fases (sólida, líquida e gasosa) [19]. Do ponto de vista da eficiência e desempenho dos sistemas de energia geotérmica de muito baixa entalpia, o tipo de solo revela ser um parâmetro importante.

Em geral, solos com elevado teor de água conduzem mais rápido o calor do que os com baixo teor de água [20]. Maciços terrosos constituídos por argilas, matéria orgânica ou xisto têm uma condutibilidade térmica reduzida, afetando o fluxo de energia térmica na envolvente das estacas de fundação. A condutibilidade térmica aumenta com a presença de elevados teores de quartzo. Porém, se as quantidades de quartzo forem demasiado elevadas podem interferir na eficácia das trocas de temperatura entre o solo e as fundações [21].

Florides e Kalogirou [22] referem que camadas de arenito, que têm elevada condutibilidade térmica, têm menores gradientes geotérmicos do que camadas de xisto ou carvão, com condutibilidades térmicas muito baixas. Isto significa que é difícil apurar qual o solo mais indicado para a aplicação deste tipo de tecnologia.

3.2.2. Condições freáticas

A existência de água nos solos pode ter um efeito significativo no funcionamento dos sistemas geotérmicos. Sobretudo se essa água não estiver em equilíbrio hidrostático, ou seja, se existir percolação da água [23]. Os fluxos de água no solo dependem muito da profundidade do nível freático e do tipo de estratos do maciço terroso. Caso estes fluxos sejam relevantes, o risco de a energia térmica se afastar da zona de fundação é acrescido, comprometendo por completo toda a solução tecnológica [20,23].

Em solos com baixa permeabilidade os fluxos de água são baixos e por consequente o efeito da convecção é mínimo. Isto indica que a percolação da água pode afetar de maneira positiva os sistemas geotérmicos, já que existe uma moderação nas temperaturas do fluido, seja na função de aquecimento seja não função de arrefecimento [20,24].

3.3. Principais propriedades térmicas do solo

O conhecimento e compreensão das principais propriedades térmicas do solo são fulcrais para a uma boa operacionalidade dos sistemas geotérmicos. Estas características permitem estudar e modelar o comportamento térmico do solo, bem como a sua interação com outros elementos estruturais.

De acordo com Brandl [9], existem três propriedades importantes e que afetam o sistema: a condutibilidade térmica, o calor específico/capacidade calorífica e a difusividade térmica. Existe uma outra propriedade, a densidade, que apesar de não ser uma característica térmica, influencia o comportamento térmico dos solos.

3.3.1. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica, k , define a quantidade de calor por unidade de tempo, que atravessa uma determinada área de um dado material. No fundo, avalia a capacidade de um material em conduzir calor. Expressa-se em W/(m.K) (unidades SI) [25].

Nos solos características como a densidade, o teor em água e a composição mineralógica interferem na condutibilidade térmica [9].

Pode ser determinada, com algum rigor, recorrendo a modelos teóricos. Dependendo da precisão que se quer, ensaios de laboratório e/ou testes de campo deverão ser feitos [7,9].

3.3.2. Difusividade térmica

A difusividade térmica, D , mede a profundidade e velocidade com que uma onda de calor penetra no solo. Pretende avaliar a dispersão da energia térmica no solo. Expressa-se em cm^2/s .

Medindo a temperatura em dois pontos do solo a profundidades diferentes, é possível, a partir da diminuição de amplitude da onda ou do intervalo de tempo, determinar a difusão de calor [9].

3.3.3. Calor específico/ Capacidade calorífica

O calor específico, C_p , é a quantidade de calor necessária fornecer à unidade de massa de um material para elevar a sua temperatura de um grau e expressa-se em calorias por grama e por grau celsius [25]. No solo, características como a textura, estrutura e humidade afetam o calor específico [26].

A capacidade calorífica, C , caracteriza a quantidade de energia armazenada num material por unidade de massa por unidade de variação de temperatura e faz-se representar pelas unidades SI, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ [9]. Por outras palavras, é igual ao calor específico de um dado material multiplicado pela sua massa.

3.4. Transferências de temperatura no solo

A energia térmica de um corpo pode ser transferida devido a uma diferença de temperaturas. Um corpo que esteja a uma temperatura diferente do seu meio envolvente, pode receber ou perder energia térmica, ou seja, ganhar ou perder calor. Este processo é designado por transferência de calor [27].

O estudo da transmissão de calor é feito com base em pressupostos termodinâmicos na medida em que respeitam a primeira e segunda lei da termodinâmica. A primeira lei aplica-se para assegurar a conservação da energia e a segunda lei para determinar o sentido do fluxo de calor [27].

As transferências de calor no solo ocorrem devido aos seguintes mecanismos [9]:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação;
- Vaporização e condensação;
- Ciclos de gelo-degelo;
- Troca de iões.

Nem todos estes processos contribuem da mesma maneira para as trocas de energia térmica no solo. Diversos estudos indicam, que o principal fenómeno de permutação de calor é a condução. Contudo, a convecção, apesar de não ser tão predominante, é um mecanismo a ter em conta, assim como a vaporização e condensação, e os ciclos de gelo-degelo. O efeito da radiação é considerado insignificante no balanço final das transferências de calor [9,20].

3.4.1. Condução

A condução é entendida como a transferência térmica causada por uma diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio ou entre dois meios em contacto (Figura 10) [9]. A condução é atribuída três fenómenos:

- Interação molecular;
- Deslocamento de eletrões livres;
- Radiação intermolecular.

De acordo com a lei de Fourier, o fluxo de calor por condução é definido pela equação seguinte:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{Q}{A} = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Onde,

k é a condutibilidade térmica;

$\frac{\partial T}{\partial x}$ é derivada parcial da temperatura na direção x .

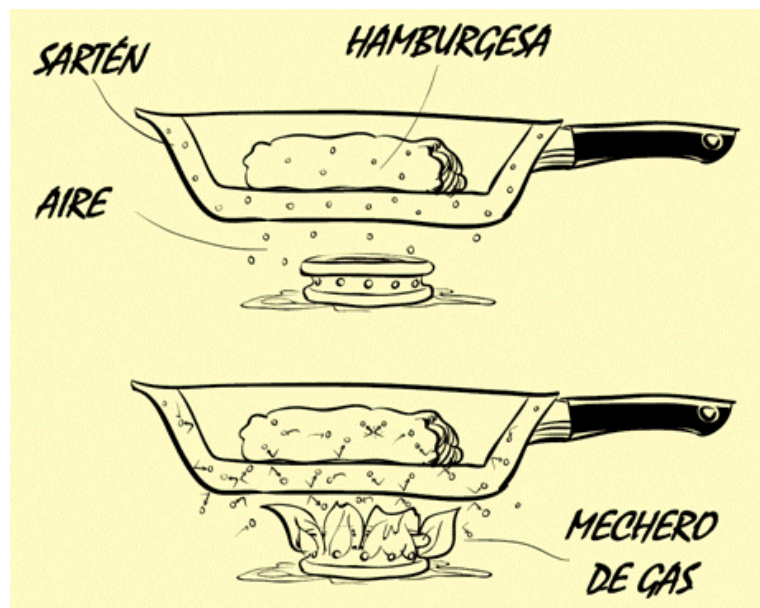


Figura 10 – Mecanismo de propagação do calor por condução [4].

3.4.2. Convecção

A convecção consiste na transferência de calor de um determinado ponto para outro através de um fluido (líquido ou gás) que se encontra em movimento. Portanto, a convecção é induzida apenas pelo movimento de partículas (Figura 11).

Nos solos os mecanismos de convecção ocorrem apenas com a presença de água e/ou ar. Isto pode ser importante em solos granulares, onde o gradiente hidráulico mais elevado do que em solos finos permite um fluxo maior e mais rápido de água no solo [9].

O calor transferido por convecção no solo na fase líquida é dado pela seguinte expressão:

$$\dot{q}_{l,conv} = c_w \rho_w \bar{v}_w (T - T') \quad (2)$$

Em que,

c_w é o calor específico da água no solo;

ρ_w é a densidade da água no solo;

$\bar{v}_w = ki$ é o vector da velocidade da água;

T' é uma temperatura de referência.

De maneira similar pode-se escrever a expressão para a fase gasosa,

$$\dot{q}_{v,conv} = c_v \rho_v \bar{v}_v (T - T') \quad (3)$$

Quando a água que se encontra no solo, passa para o estado gasoso (vaporização) ocorre um fenómeno designado, calor latente de vaporização. Quantifica-se recorrendo à expressão:

$$\dot{q}_{lat} = L_0 \rho_w \bar{v}_v \quad (4)$$

Onde

L_0 é o calor latente de vaporização à temperatura T' .

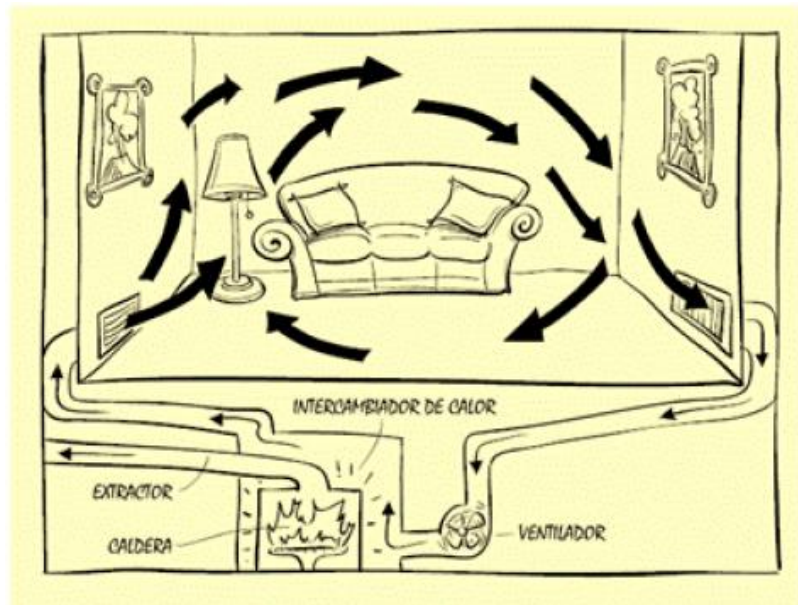


Figura 11 – Mecanismo de propagação de calor por convecção [4].

Capítulo 4

ANÁLISE NUMÉRICA

Ao longo dos últimos dois capítulos foi dado a conhecer o potencial dos sistemas geotérmicos de muito baixa entalpia, as condições ideais do seu funcionamento, bem como os fatores que interferem no seu desempenho.

Segue-se, então, o capítulo da análise numérica onde são apresentados os programas utilizados e o modelo numérico que servirá de base para o estudo das permutas de temperatura.

4.1. Considerações gerais

A maior ou menor dificuldade de uma análise numérica depende do problema em questão, e da complexidade do modelo numérico. Para efetuar o estudo das transferências de temperatura entre o solo e os elementos estruturais recorreu-se a um programa de elementos finitos volumétricos. Este programa tem a particularidade de pertencer ao ramo da mecânica de fluídos conhecido por *CFD* - *Computational Fluid Dynamics*, ou seja, Cálculo Automático em Dinâmica de Fluídos. O *software* de *CFD* é usado para simular a interação de líquidos, gases e sólidos com base em algoritmos e métodos numéricos. Abrange um vasto leque de fenómenos desde escoamentos, combustão, reações químicas, aerodinâmica e, claro está, as transferências de calor [28,29,30].

Atualmente existem inúmeros programas de elementos finitos capazes de dar resposta aos problemas com que a engenharia se vai deparando. Após uma análise de potencialidades de alguns deles, optou-se por trabalhar com o programa *ANSYS FLUENT* em conjunto com um programa de geração de dados designado por *POINTWISE*.

Cada um deles foi usado para fases diferentes da modelação numérica. Numa primeira fase, o *POINTWISE*, foi utilizado para desenhar o modelo e gerar as malhas para posterior cálculo. Na segunda fase foi usado o *ANSYS FLUENT* para a análise de transferências de temperatura.

4.2. Os programas utilizados

Como foi referido anteriormente para efetuar os estudos das transferências de calor foram utilizados dois programas informáticos que serão apresentados de forma muito breve neste subcapítulo.

POINTWISE

Foi desenvolvido pela empresa norte-americana - *POINTWISE, INC* – e é usado para gerar as mais variadas malhas dos modelos numéricos criados pelos utilizadores para que

depois sejam calculadas por programas de *CFD*. No fundo é um pré-processador de cálculo, ou seja, o modelo é previamente gerado no *POINTWISE*, e só numa fase posterior é analisado pelo programa de volumes finitos, neste caso, o *FLUENT*.

Esta empresa tem largos anos de experiência no desenvolvimento, suporte e aplicação de *software* para criação de malhas, tentando assim dar resposta aos inúmeros desafios com que os cientistas e engenheiros se deparam diariamente [31].

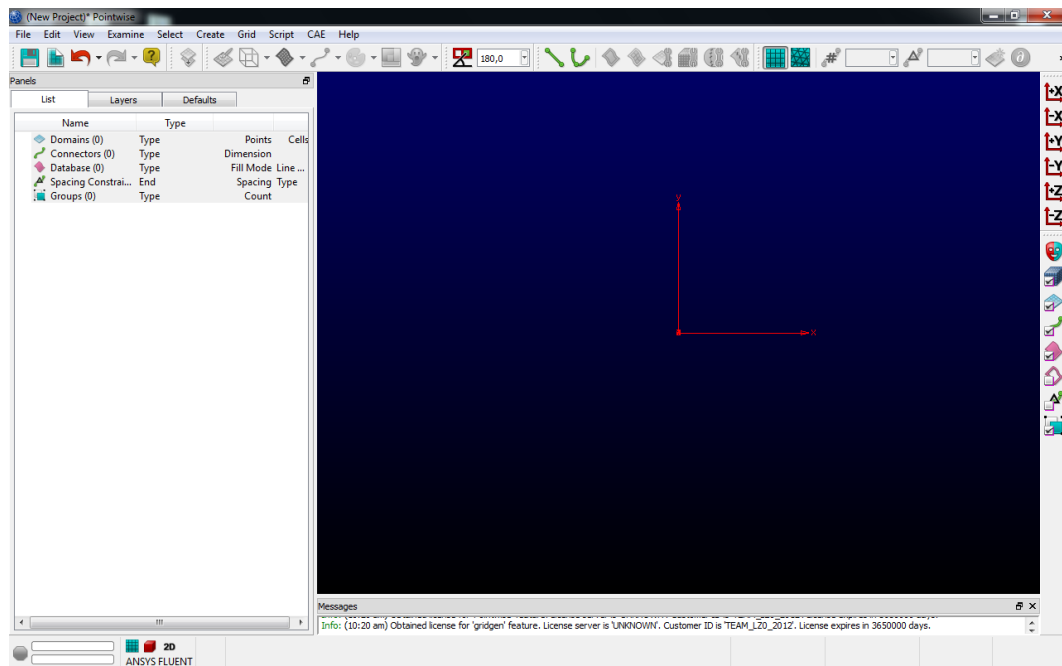


Figura 12 – Ambiente de trabalho do *POINTWISE*.

ANSYS FLUENT

O *FLUENT* é um programa do ramo da dinâmica de fluídos computacional e está integrado no programa “mãe” *ANSYS*. Como já foi referido os programas de cálculo de *CFD* são indicados para simular as transferências de temperatura. De sublinhar que, apesar de tudo, existe sempre alguma incerteza quanto a este tipo de fenómenos, no entanto, é uma ajuda fulcral na caracterização e quantificação do problema proposto [30].

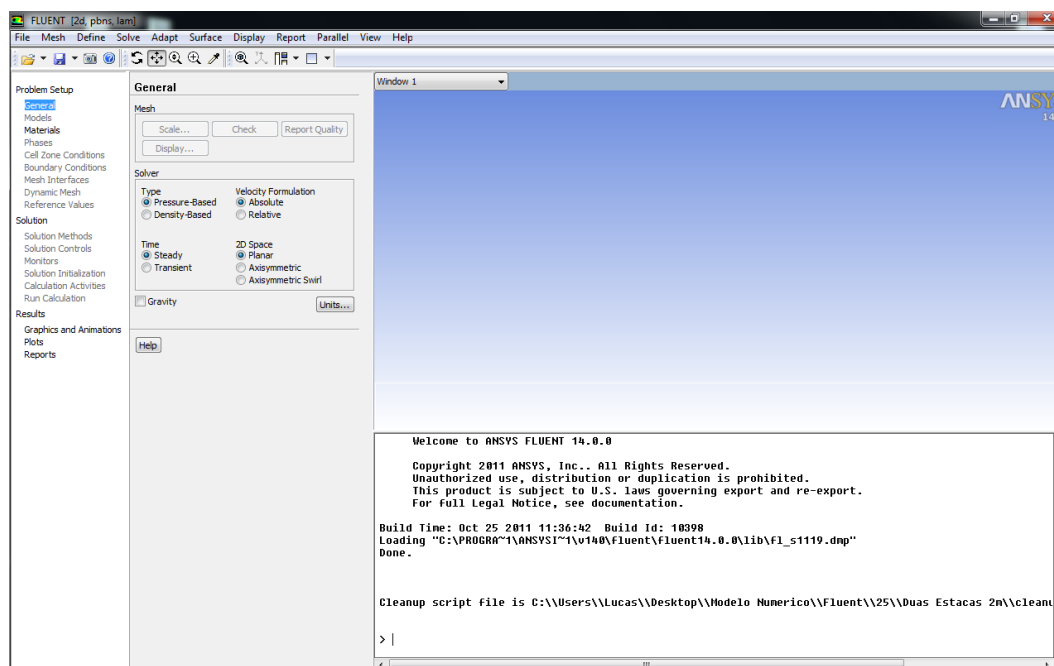


Figura 13 – Ambiente de trabalho do *FLUENT*.

4.3. O modelo numérico

Dado que se trata de um estudo inicial de desenvolvimento de um tema inédito no nosso país, começou-se por fazer uma abordagem ao problema em 2D e com algumas simplificações. Elaborou-se um modelo com duas paredes enterradas num solo homogêneo, separadas entre si com diferentes distâncias e com temperaturas constantes para estas e para o solo, e procurou-se estudar a difusão térmica ao longo da envolvente solo-parede.

Assim sendo, várias fases tiveram que ser realizadas para se preparar o modelo. Essas fases podem ser resumidas nos seguintes pontos: geometria, materiais, atribuição dos domínios/definição das malhas e condições de fronteira.

Geometria

A primeira parte da definição do protótipo consistiu em analisar quais seriam as medidas mais indicadas que este deveria ter. A opção entre uma determinada dimensão, ou outra qualquer, pouca ou nenhuma interferência teria, com a exceção da profundidade do

solo, uma vez que nos primeiros 30m a temperatura média dos solos em Portugal é de 17°C [32]. Adotou-se, então, um modelo com as seguintes dimensões (Figura 14):

- Largura da faixa de solo igual a 30m;
- Profundidade da faixa de solo igual a 30m;
- Duas paredes com 25m de comprimento, 0,6m de espessura e distanciadas entre si de 2m, 5m, 10m e 25m.

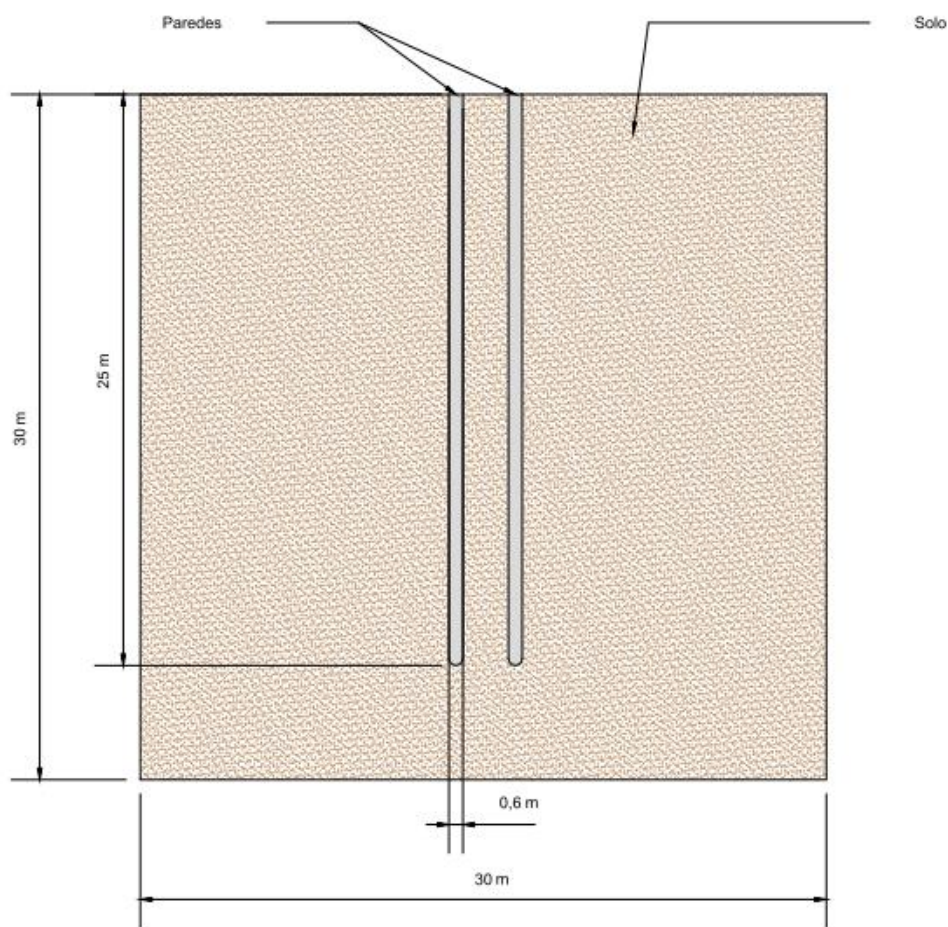


Figura 14 – Esquema geral do modelo adotado.

Materiais

Naturalmente os materiais utilizados no modelo são o solo e o betão armado. A Tabela 2 mostra os valores das propriedades de cada material que o FLUENT considera para efeitos de cálculo.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais utilizados.

<i>MATERIAL</i>	γ (kg/m^3)	C_p ($J/kg-K$)	k ($W/m-K$)
<i>Solo</i>	1800	850	0,9
<i>Betão Armado</i>	2500	750	2,0

Atribuição dos domínios/ Definição das malhas

Neste ponto entramos no âmbito do primeiro programa utilizado na elaboração do modelo, o *POINTWISE*. Após se delinear o modelo é necessário executar determinadas etapas para que o *POINTWISE* possa pré-processar toda a informação requerida pelo *FLUENT*. Uma dessas etapas consiste em atribuir os domínios correspondentes a cada um dos materiais, ou seja, um domínio para o solo e um outro para o elemento estrutural.

A razão pela qual se definem os domínios prende-se com a questão da criação das malhas para efeitos de cálculo. O programa exige ao utilizador a delimitação de cada zona (domínios) correspondente a cada um dos materiais para depois poder gerar a malha e consequente cálculo.

Resumidamente existem dois tipos de malhas que se podem gerar: as malhas estruturadas e as não estruturadas. Optou-se pela segunda uma vez que se adapta com facilidade à maior ou menor complexidade da geometria. A Figura 15 e a Figura 16 mostram os domínios e respetivas malhas criadas.

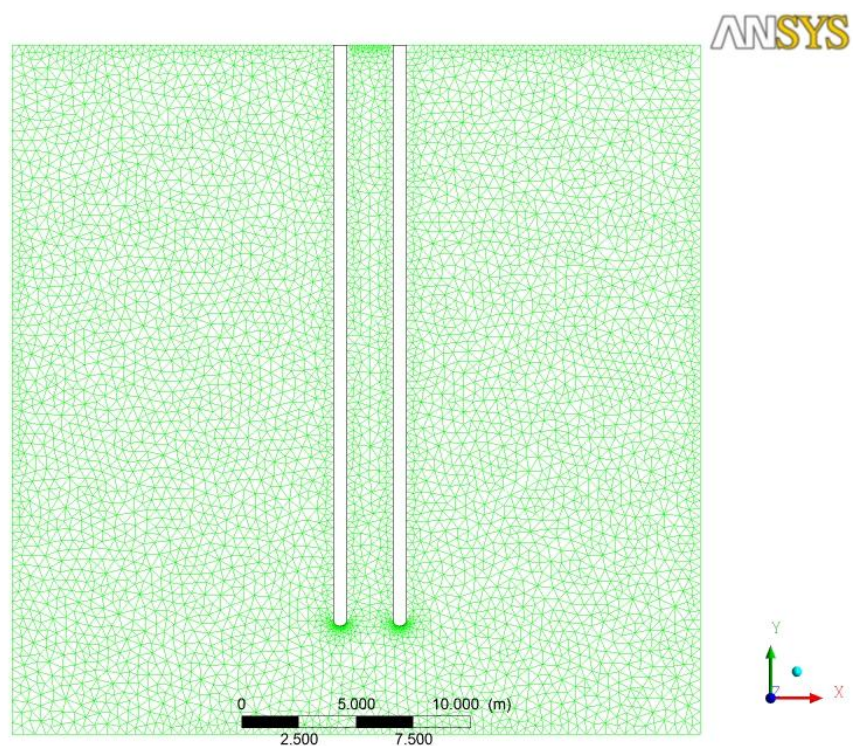


Figura 15 – Domínio e malha gerada para o solo.

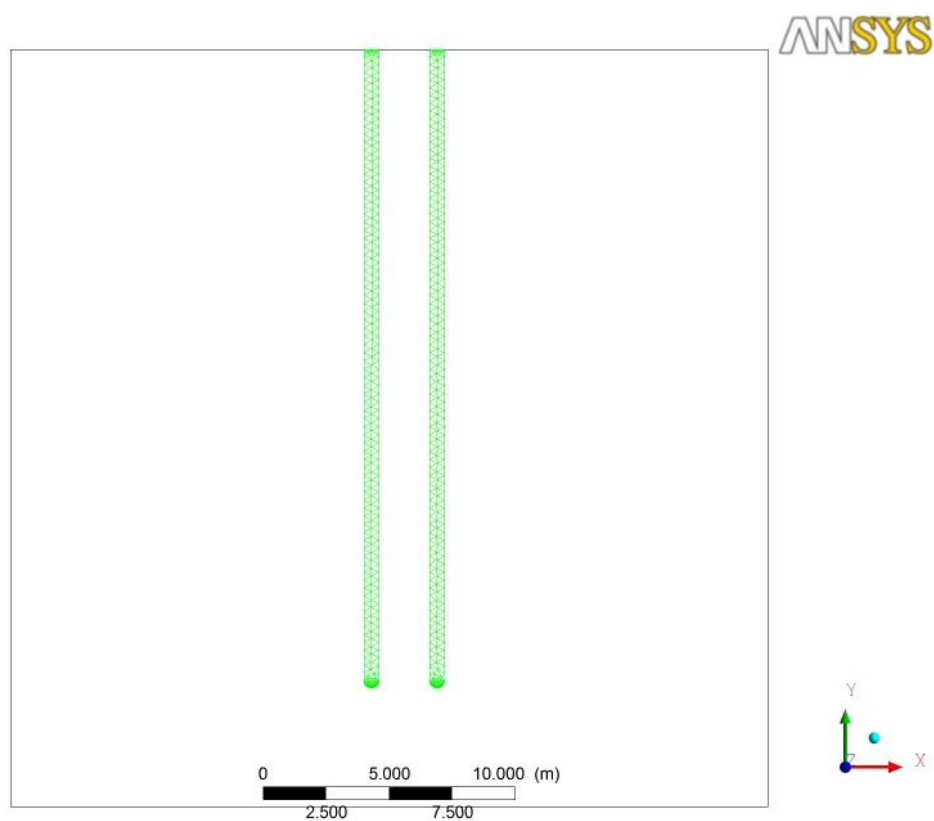


Figura 16 – Domínio e malha gerada para as paredes.

Condições de fronteira

Esta é uma das etapas mais importantes na definição de um modelo numérico uma vez que é aqui que são impostas todas as condições que o utilizador decidir adotar para o seu problema. Os programas informáticos empregados nesta análise permitem escolher uma série de tipos de condição fronteira de acordo com o tipo de problema que se tem. Seja ele de escoamentos, transferências de temperatura ou qualquer outro fenómeno relacionado com a Mecânica de Flúidos Computacional.

Neste caso específico, a condição fronteira aplicada foi a do tipo *Wall*. Este tipo de fronteira é a utilizada para delimitar zonas de fluídos ou de sólidos. Funciona como uma parede onde podem ser imputados dados relativos ao comportamento térmico das zonas delimitadas, como por exemplo, temperatura, fluxo de calor, convecção e radiação.

Para o estudo efetuado foram consideradas 4 condições fronteira: *Fundo*, *Laterais*, *Topo-solo* e *Topo-parede*. Todas estas fronteiras foram previamente definidas no *POINTWISE*. Importante referir que existe uma outra condição fronteira. Trata-se da zona de contacto entre o solo e as paredes, ou seja, a linha que delimita as paredes idealizadas. Esta fronteira não é determinada diretamente pelo utilizador. Uma vez que se trata de uma região de transição de um material para outro (do solo para o betão armado), o *FLUENT* considera aqui uma condição fronteira, também, do tipo *Wall* denominada *Shadow*. Isto permite que se tenha mais facilidade em atribuir dados na envolvente solo-parede, e consequente maior capacidade em analisar as permutas de temperatura.

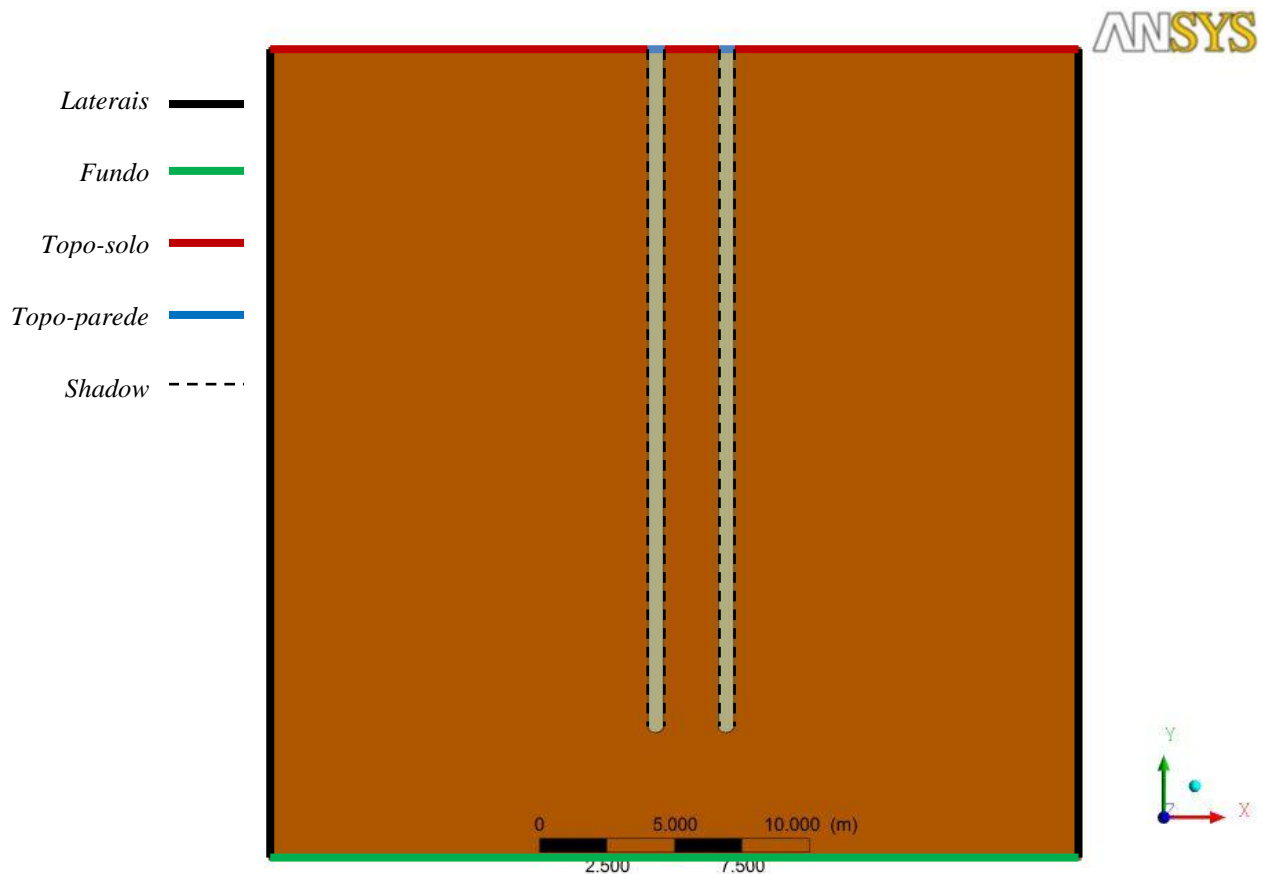


Figura 17 – Condições fronteira definidas para o modelo.

4.4. FLUENT – Equações de base

Com este subcapítulo pretende-se dar a conhecer as equações que o *FLUENT* considera para efetuar os cálculos do trabalho proposto.

Para isso é importante relembrar quais os fenómenos de transferência de calor que mais contribuem para os sistemas geotérmicos. De acordo com a bibliografia supracitada em 3.4, a condução de calor é o principal mecanismo de permuta de temperatura nos solos, embora a convecção tenha alguma expressão no balanço energético final.

A equação de base resolvida pelo *ANSYS FLUENT* é a Equação de Energia que se apresenta da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(\mathbf{k}_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j \mathbf{h}_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v}) \right) + \mathbf{S}_h \quad (5)$$

Onde \mathbf{k}_{eff} é condutividade efetiva e \vec{J}_j é o fluxo de difusão do índice j . Os três primeiros termos do lado direito da equação representam a energia devido há condução, difusão do índice j e dissipação viscosa, respetivamente. \mathbf{S}_h inclui o calor de reações químicas, ou outras fontes de calor volumétrico definidas pelo utilizador [33].

Na equação (5),

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (5.1)$$

Onde h é a entalpia sensível definida para gases ideais,

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (5.2)$$

E para gases incompressíveis vem,

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (5.3)$$

Nas equações x e z Y_j é a fração em massa do índice j ,

$$\int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j} dT \quad (5.4)$$

Como este modelo numérico é constituído por materiais sólidos o *FLUENT* resolve a seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (6)$$

Onde,

ρ = densidade

h = entalpia sensível, $\int_{T_{ref}}^T C_p dT$

k = condutibilidade

T = temperatura

S_h = fonte de calor volumétrica

O segundo termo, no lado esquerdo da equação 5 representa a transferência de energia por convecção devido ao movimento de rotação ou de translação dos sólidos. O campo de velocidade, \vec{v} , é calculada a partir do movimento especificado para a zona sólida. Os termos no lado direito da equação 5 são o fluxo de calor devido à condução e fontes de calor volumétrico dentro do sólido, respetivamente [33].

Capítulo 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Explicadas as fases de preparação do modelo numérico idealizado, segue-se a apresentação dos vários casos de estudo efetuados e os seus respetivos resultados e discussão.

Sucintamente pode-se dividir este estudo em duas análises. Uma primeira análise (Análise 1) feita para uma temperatura constante das paredes de 25°C e do solo de 17°C. As paredes estão inicialmente afastadas entre si de 2m, e seguidamente faz-se variar esta distância para 5m, 10, e 25m. Este caso pretende avaliar a descarga térmica das paredes no solo, uma vez que este se encontra a temperatura mais baixa. Deseja-se, ainda, observar o comportamento dos bolbos de temperatura gerados ao longo das paredes e a possível perturbação entre eles.

A segunda análise (Análise 2) é, em quase tudo, idêntica à anterior. Apenas se altera a temperatura das paredes de 25°C para 10°C. Com isto prevê-se presenciar uma absorção de energia térmica por parte das paredes, dado que o solo se encontra a uma temperatura superior.

Para simplificação e melhor compreensão dos casos de estudo elaborados, criou-se uma tabela (Tabela 3) que resume todas as situações.

Tabela 3 – Resumo dos casos de estudo elaborados.

		<i>DISTÂNCIA ENTRE PAREDES (m)</i>			
		<i>2</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>25</i>
<i>ANÁLISE 1</i>	<i>Temperatura das Paredes (°C)</i>	25	25	25	25
	<i>Temperatura do Solo (°C)</i>	17	17	17	17
<i>ANÁLISE 2</i>	<i>Temperatura das Paredes (°C)</i>	10	10	10	10
	<i>Temperatura do Solo (°C)</i>	17	17	17	17

5.1. Análise 1

Como já foi referido anteriormente, nesta primeira análise as paredes encontram-se a uma temperatura de 25°C e o solo a 17°C. De seguida, apresentam-se os resultados adquiridos através da análise numérica realizada no programa *ANSYS FLUENT*.

Distância entre paredes igual a 2m

Este é o formato obtido para dissipação da energia térmica ao longo das paredes. Expectava-se que o bolbo de energia térmica fosse simétrico segundo o eixo longitudinal de cada parede, mas devido à grande proximidade entre as paredes acabou por existir uma sobreposição dos bolbos energéticos, provocando assim um campo térmico entre elas de temperaturas muito próximas dos 25°C, ou seja, semelhantes às das emitidas pelas paredes.

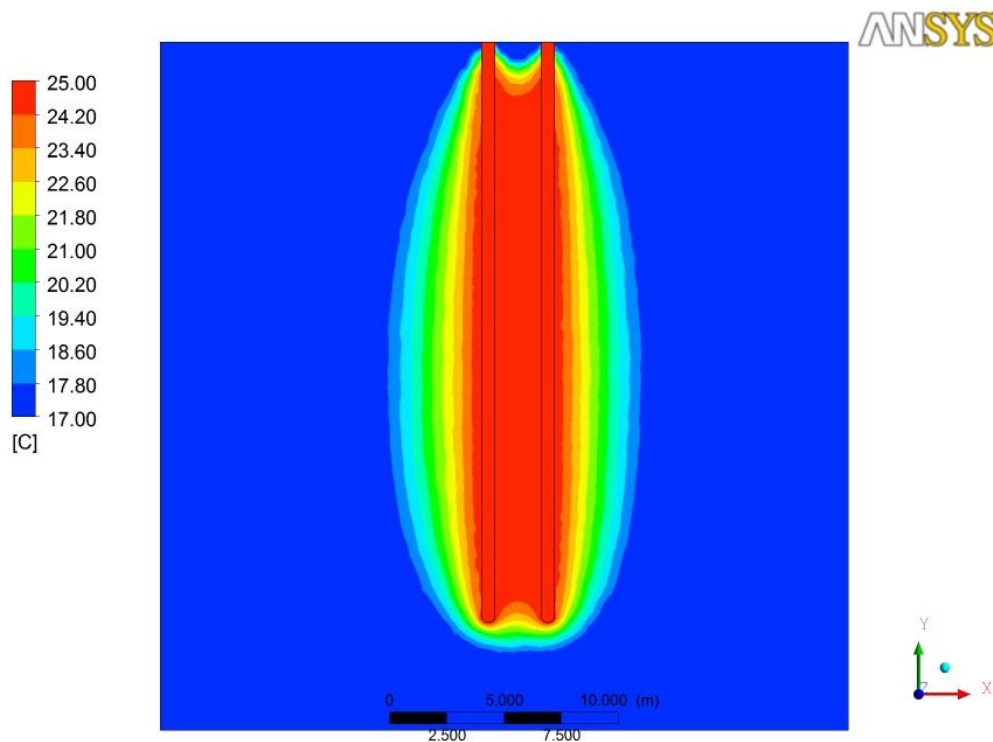


Figura 18 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 2m.

Distância entre paredes igual a 5m

A Figura 19 mostra o resultado obtido para a situação em causa. Aqui, uma vez mais, seria de prever simetria na dissipação de energia ao longo do eixo longitudinal das paredes.

Apesar da distância entre estas ter aumentado perdura uma forte interferência entre os bolbos de temperatura. Continua a observar-se, na zona entre as paredes, temperaturas a rondar os 25°C.

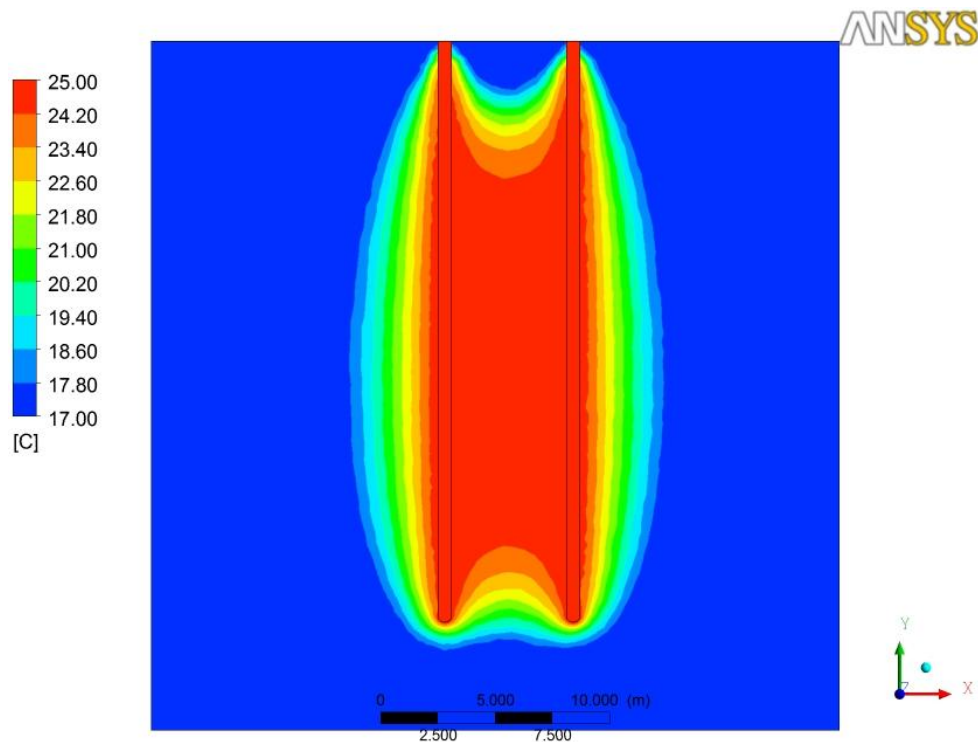


Figura 19 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 5m.

Distância entre paredes igual a 10m

Tal como nos casos anteriormente apresentados, também, aqui se confiava que a dissipação de energia térmica tivesse semelhante comportamento.

Contudo, pode facilmente observar-se que com o aumento da distância entre as paredes, menor é a perturbação existente entre cada um dos bolbos de temperatura gerados. Na Figura 20 são visíveis as curvas de difusão de temperatura, desde a zona interior entre as paredes até aos extremos de cada uma destas.

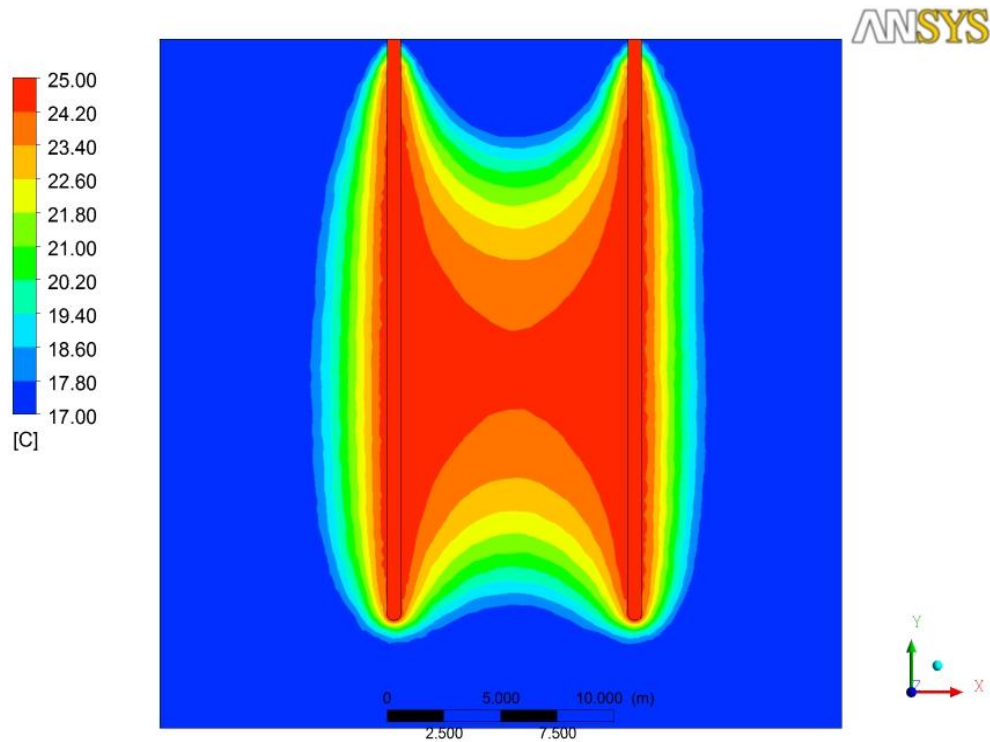


Figura 20 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 10m.

Distância entre paredes igual a 25m

Para esta última situação aumentou-se consideravelmente a distância entre paredes relativamente aos casos anteriores. Pretendeu-se com isto ter uma análise em que não haja nenhuma sobreposição entre os bolbos de temperatura.

Estudando a Figura 21, verifica-se que para a distância de 25m não existe qualquer perturbação entre os bolbos. Pode, ainda, presenciar-se uma declarada tendência das curvas de dissipação de energia térmica se deslocarem da face interior de cada parede para um ponto a meia distância dentre estas.

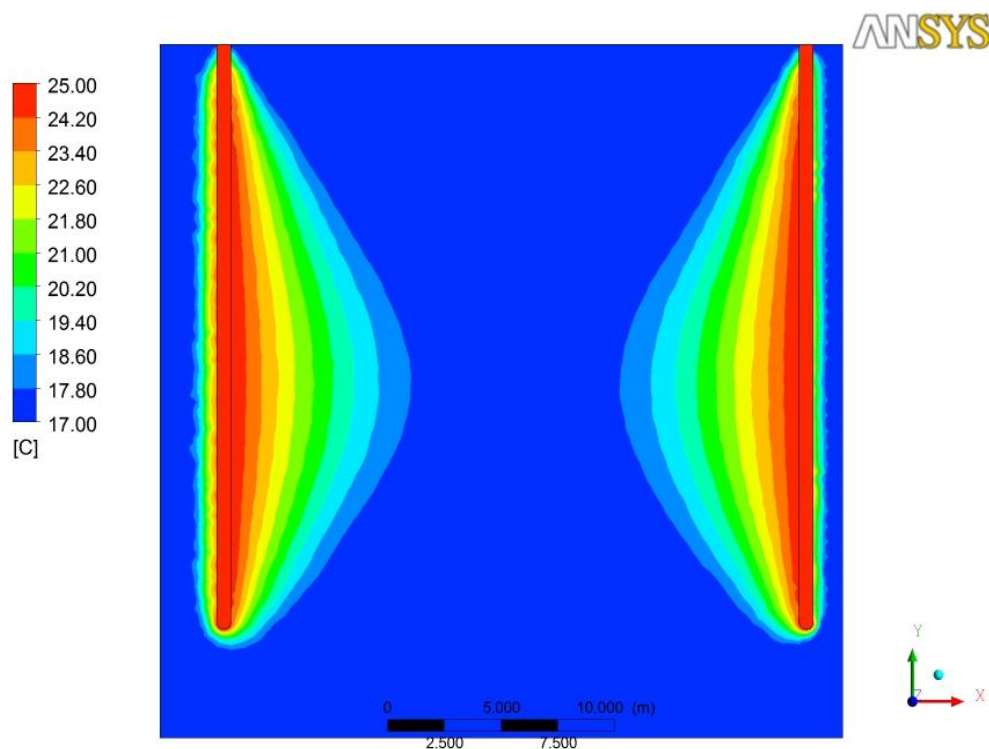


Figura 21 – Bolbo de temperatura gerado ao longo das paredes. Distância igual a 25m.

5.2. Análise 2

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados adquiridos para a Análise 2. Esta análise já explicada anteriormente, consiste num abaixamento da temperatura das paredes de 25°C para 10°C, mantendo-se o solo a 17°C.

Para exibição dos resultados obtidos neste estudo, optou-se por organizar de uma forma ligeiramente diferente da análise anterior. Em lugar de se descrever individualmente cada caso acompanhado da respetiva imagem com o resultado, será feita uma descrição geral do que foi observado em todos os casos, seguindo-se a apresentação das figuras correspondentes a cada um. A opção por este formato de exposição dos resultados, prende-se com o fato de todos os casos terem tido o mesmo desfecho.

Avançando, então, na descrição dos resultados alcançados pode verificar-se que as paredes sofreram um acréscimo de temperatura com a exceção do topo das paredes.

Acréscimo este significativamente considerável, uma vez que a temperatura das paredes se torna constante em quase toda a sua extensão e de valor igual à do solo (17°C). No topo das paredes, aproximadamente no primeiro metro de profundidade, verificam-se variações de temperatura com amplitudes térmicas entre os 10°C e os 17°C. As figuras que se seguem poderão elucidar melhor toda a descrição feita anteriormente.

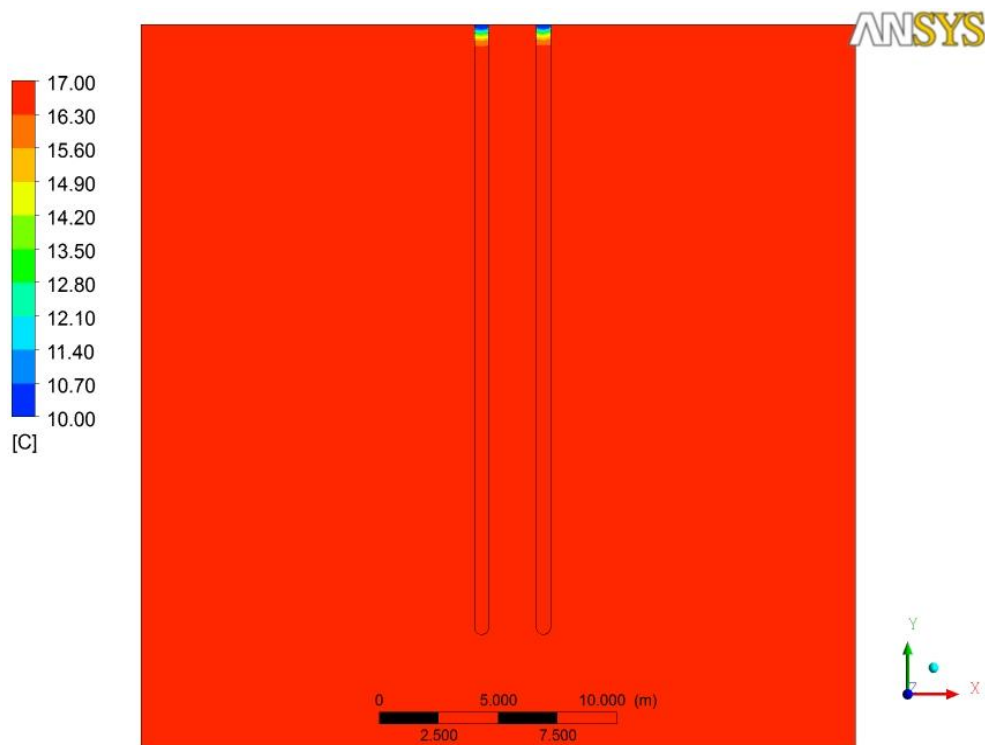


Figura 22 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 2m.

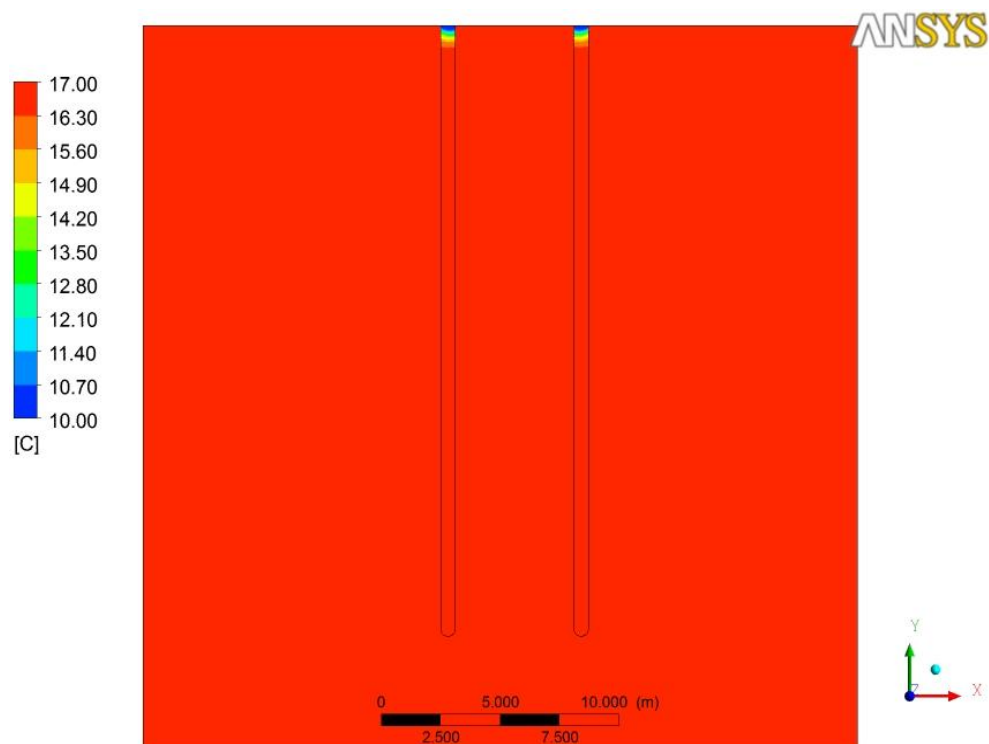


Figura 23 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 5m.

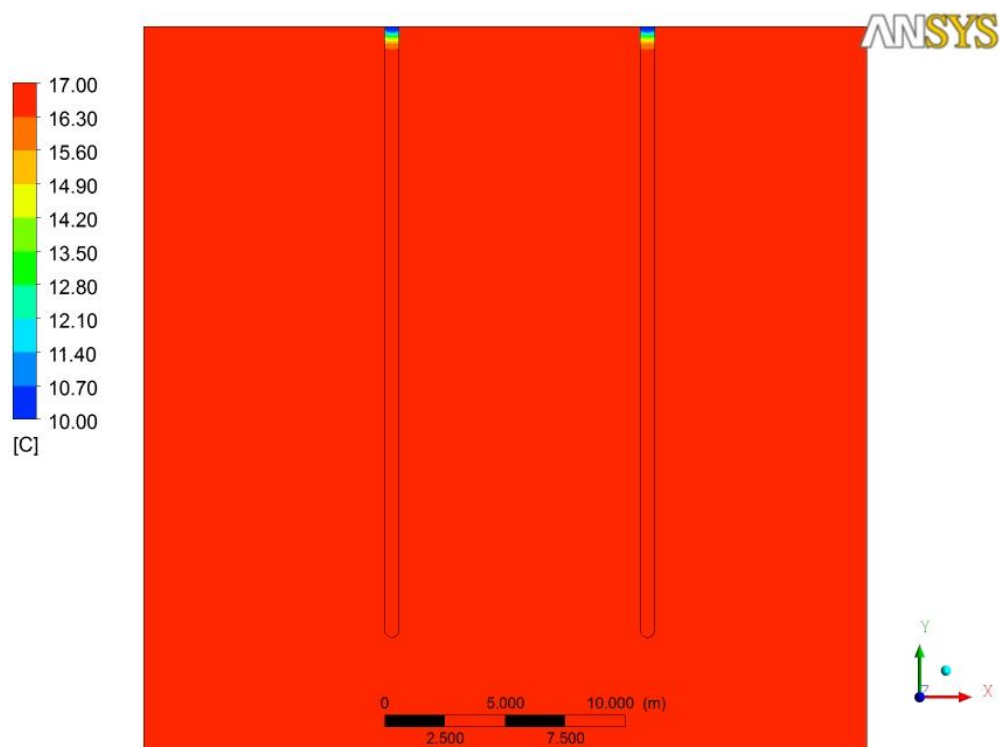


Figura 24 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 10m.

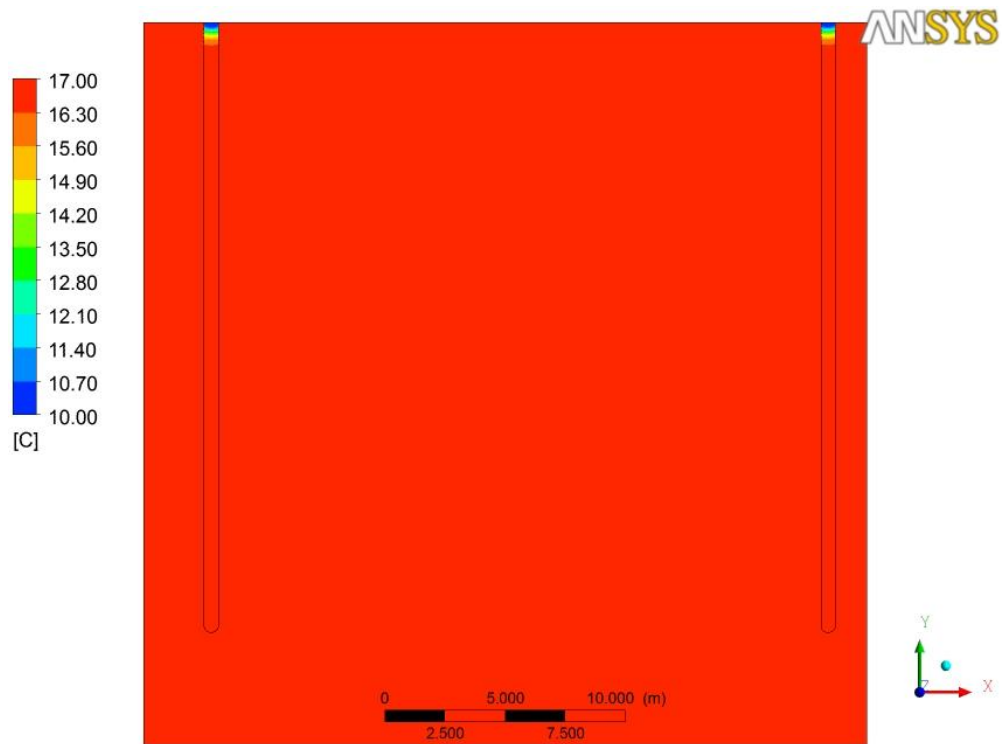


Figura 25 – Temperaturas obtidas para distância entre paredes igual a 25m.

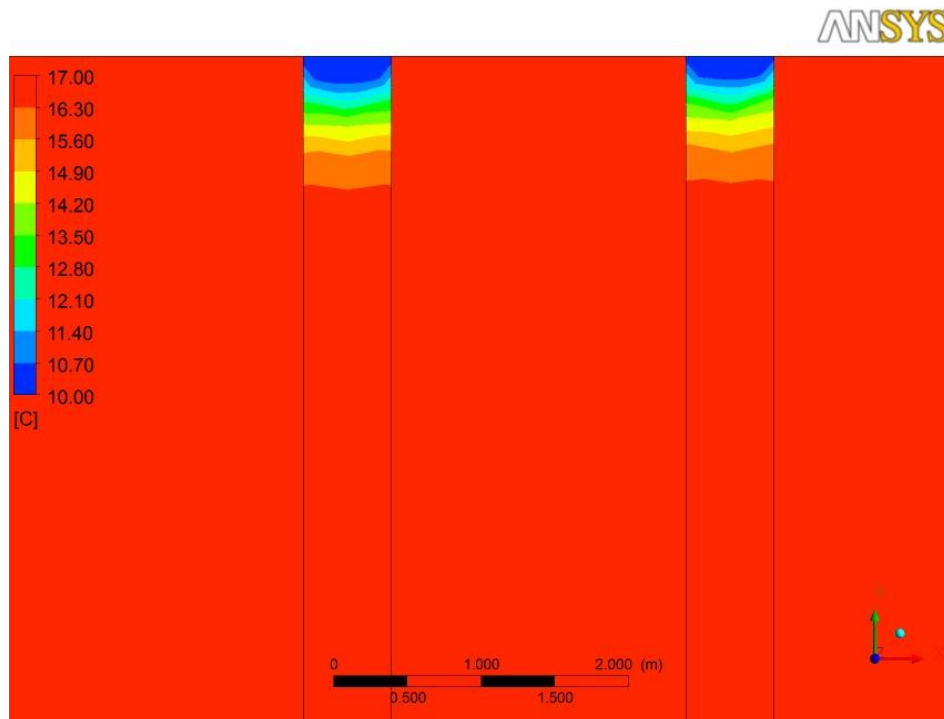


Figura 26 – Pormenor da distribuição das temperaturas no topo das paredes.

5.3. Discussão de resultados

Apresentados os resultados obtidos da análise numérica do problema, é chegada a altura de os discutir, e perceber o comportamento das transferências de temperatura na envolvente solo-parede para as duas análises efetuadas.

Da observação das figuras apresentadas na primeira análise (Análise 1), pode-se verificar claramente a existência de bolbos de energia térmica ao longo do eixo longitudinal das paredes. A formação destes bolbos era um comportamento previsto à partida para esta análise, uma vez que a temperatura das paredes é mais elevada que a do solo, e assim sendo, teria que existir uma dissipação da energia para a sua envolvente.

Embora o comportamento da difusão térmica fosse o esperado, este não é um reflexo fidedigno do que se prevê que aconteça na realidade, uma vez que a temperatura vai sendo libertada ao longo das paredes, será de esperar uma maior dissipação da energia térmica na fase inicial das paredes e abrandamento com o aumento da profundidade.

Para sustentar o parágrafo anterior apresenta-se na Figura 27 o resultado de uma simulação numérica realizada para estudar as transferências de calor entre o solo e as estacas de betão armado com e sem percolação de água [34]. A figura demonstra o resultado obtido para a não existência de percolação da água, e pode observar-se que a dissipação da temperatura é muito mais evidente no topo da estaca e com menor expressão junto à ponta.

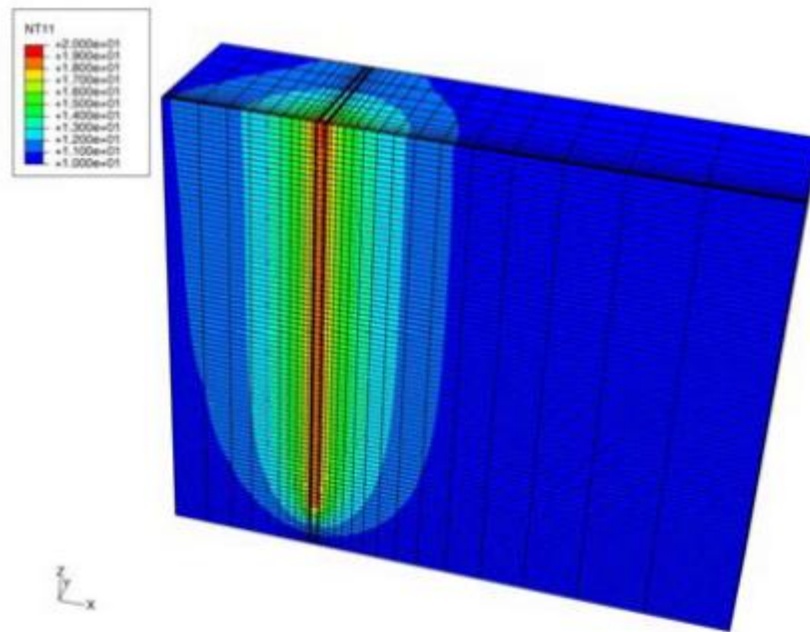


Figura 27 – Dissipação da temperatura ao longo de uma estaca [34].

Outro aspeto importante de destacar nesta discussão de resultados prende-se com a interferência entre as curvas de energia térmica geradas ao longo de cada parede. Seria expectável que houvesse simetria segundo o eixo longitudinal, caso a simulação fosse realizada apenas com uma parede enterrada no solo. Na verdade, optou-se propositadamente por realizar as simulações com duas paredes, justamente para avaliar até que ponto existe perturbação ou não entre os bolbos. Nas figuras 18, 19 e 20 é perfeitamente visível uma perturbação entre os bolbos de temperatura, devido à proximidade entre as paredes. Consoante a distância aumenta de 2m para 5m, e seguidamente para 10m, é perceptível uma menor intromissão entre as curvas de difusão de temperatura. Esta perturbação acaba por se esvanecer com o acréscimo da distância entre as paredes, até ao ponto em que nenhuma interferência é registada, como mostra a Figura 21.

Embora os bolbos de dissipação de temperatura deixem de se sobrepor, subsiste uma orientação das curvas de energia térmica para a zona do solo existente entre as paredes.

Doutra forma, os bolbos de cada uma das paredes exercem uma atração um sobre o outro, provocando maiores amplitudes nas curvas de temperatura na face interior das paredes.

Observando agora as figuras com os resultados adquiridos para a segunda análise (Análise 2), verifica-se claramente que em todas as situações simuladas as paredes que inicialmente se encontravam a 10°C constantes em toda a sua extensão, comportaram um aumento de temperatura provocada pelo solo, igualando o seu valor de 17°C com a exceção do topo das paredes. Este comportamento era o esperado, dado que a massa de solo é infinitamente maior quando comparada com a massa das paredes, e portanto estas acabam por absorver por completo a temperatura da sua envolvente em praticamente toda a sua área.

Como já foi relatado, no topo das paredes não se verificou o mesmo comportamento, o que causa alguma estranheza. Esperava-se que toda a massa das paredes ficasse à mesma temperatura do solo, mas tal não aconteceu.

Resumindo esta discussão de resultados pode afirmar-se que o comportamento das transferências de temperatura registado nos modelos calculados está de acordo com o que estava previsto à partida para cada uma das análises. Exceção feita para a Análise 2, onde se especulava que toda a área das paredes sofresse um aumento de temperatura. Tal não se verificou e o topo das paredes, até a uma profundidade de 1m aproximadamente, apresenta variações de temperatura.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como meta contribuir para o desenvolvimento, melhoramento e divulgação dos sistemas geotérmicos como fonte de energia renovável, e simular as transferências de temperatura na envolvente solo-parede com recurso a um programa de cálculo.

O presente capítulo apresenta as conclusões retiradas ao longo da investigação feita para o alcance desses objetivos, as dificuldades encontradas no processo de aprendizagem dos programas informáticos, e ainda são feitas algumas sugestões para futuros trabalhos no âmbito da energia geotérmica.

6.1. Conclusões e comentários

A elevada dependência energética da sociedade atual está a provocar uma mudança de ideias e estratégias em relação às energias renováveis. É necessário reunir esforços multidisciplinares de modo a criar edifícios energeticamente eficientes.

Os sistemas de utilização do solo para fins de climatização estão cada vez mais a ser considerados como uma fonte de calor alternativa e eficaz. Já deu provas disso, em países como a Áustria, Suíça, Alemanha e Espanha. Em Portugal, pode-se afirmar que o recurso a esta técnica é praticamente inexistente muito por culpa do desconhecimento, ceticismo e falta de divulgação que ainda envolve este tema.

Revela-se importante referir novamente que este é um estudo inicial de desenvolvimento de um tema inédito no nosso país, e que está fora do âmbito da Engenharia civil em geral. O autor deparou-se com o enorme desafio de estudar os conteúdos de uma área que lhe era praticamente desconhecida.

O mesmo se aplica para os programas de cálculo automático. O software utilizado para alcançar o objetivo desta tese é vulgarmente aplicado no ramo da Engenharia Mecânica. Apesar do autor ter já alguma experiência com programas informáticos, a habitual fase de aprendizagem foi acrescida de obstáculos, dado que estes eram completamente desconhecidos e a maioria dos conceitos eram novos.

Uma vez que ainda se estão a descobrir ferramentas e tentar compreender como modelar, determinou-se que esta fase embrionária da modelação da transferência térmica do solo com os elementos de betão armado das fundações seria a duas dimensões. Isto obrigou a reformular a estratégia que estava prevista nos objetivos primordiais desta dissertação, isto é, os elementos estruturais utilizados na simulação não poderiam ser considerados estacas de betão armado, mas sim paredes enterradas no solo paralelamente entre si. Para se poderem utilizar as estacas na simulação este estudo teria de ser elaborado a três dimensões, o que elevaria ainda mais o grau de dificuldade desta dissertação.

Apesar de o modelo numérico ser uma versão mais simples do que foi inicialmente projetado para esta tese, este foi elaborado respeitando os princípios da modelação e de

forma a futuramente ser tratado com mais componentes e outros tipos de elementos estruturais mais interessantes por serem disponibilizados em mais situações.

Da discussão de resultados feita em 5.3, conclui-se que em geral o comportamento das transferências de temperatura, tanto da Análise 1 como da Análise 2, está próximo do que se previu inicialmente. Na Análise 1, de todos os casos simulados, pode concluir-se que a interferência entre os bolbos de dissipação de energia térmica deixa de existir para uma distância de paredes superior a 10m e inferior a 25m.

Focando agora a atenção nos objetivos propostos em 1.2 desta dissertação, pode afirmar-se que na sua maioria foram alcançados, sobretudo os três primeiros. No entanto, reconhece-se que o objetivo apontado no ponto 4 não foi superado com a taxa de sucesso que se esperava. Em todo o caso, foi dado um primeiro passo que se julga útil e importante na modelação da transferência térmica na envolvente solo-elementos de fundação.

Para finalizar este espaço de comentários e conclusões é de referir que a energia geotérmica de muito baixa entalpia tem espaço para crescer em Portugal, embora sejam ainda necessários vários estudos que englobem múltiplos fatores que permitam acrescentar um conhecimento mais rigoroso e científico a uma técnica envolta de conceitos empíricos.

6.2. Propostas para futuros trabalhos

O trabalho apresentado ao longo desta dissertação motiva diversas perspetivas de desenvolvimento futuro e que serão aqui indicadas a título de exemplo, algumas das quais já anteriormente sugeridas em programas de investigação [35] em curso na Universidade de Aveiro:

- Conseguir a modelação da transferência térmica do solo com os permutadores através dos elementos de betão armado das fundações a três dimensões;
- Determinar a influência e quantificar os fatores mais importantes (profundidade, constituição, estratificação, compactação, condutibilidade do solo, nível freático, etc) para o bom funcionamento dos sistemas e a estabilidade das estruturas que empregam esses sistemas;

- Identificar modelos constitutivos apropriados para o comportamento termo-mecânico do solo envolvente aos permutadores, que possibilitem a determinação das trocas térmicas e da influência das variações de temperatura nos solos sob tensão;
- Conseguir a modelação do comportamento do solo, da transferência térmica com permutadores, da dissipação de calor e recuperação termodinâmica do solo e da influência do estado de tensão do solo devido ao carregamento das estacas;
- Conceber e realizar monitorização e aquisição de dados em obras da UA, onde estão ser aplicados sistemas geotérmicos termo-ativos, para validação dos modelos e das variáveis de configuração;
- Determinação dos fatores que influenciam a eficiência energética das soluções, sua possível quantificação e justificação de possíveis alterações das técnicas, dos materiais, da disposição dos elementos termo-ativos, da interface com o solo, do comportamento térmico do solo, etc.;
- Determinação do efeito da temperatura nos efeitos da fluência e da relaxação em elementos de betão armado sob tensão;
- Determinação da influência das tubagens do circuito hidráulico primário e secundário na estabilidade dos elementos estruturais termo-ativos e da estrutura, na segurança relativamente à ação das variações de temperatura, na conservação material por minoração de efeitos dessa variação, na eficiência de elementos de superfície maciços e aligeirados, quer através de modelação quer através da realização de ensaios;
- Avaliação de riscos de falhas dos sistemas de produção energética com origem no solo, quer por comportamento do solo quer por ações exteriores ao sistema, como sismos, em sistemas com permutadores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. d. C. a. C. e. a. P. Europeu, "Relatório final sobre o Livro Verde " Para uma estratégia europeia da segurança do aprovisionamento energético", " 2002.
- [2] P. E. e. d. Conselho, "Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifício.," *Jornal Oficial da União Europeia*, vol. 153, pp. 13-35, 2010.
- [3] I. N. d. Estatística. (2013, Jun.) INE. [Online].
http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0007273&contexto=bd&selTab=tab2
- [4] L. Trillo and R. Angulo, *Guía de la Energía Geotérmica* . 2008.
- [5] G. Perspectives. (2011, Nov.) [Online]. <http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/04-applications-01.html>
- [6] M. Preene and W. Powrie, "Ground energy systems: from analysis to geotechnical design," *Géotechnique* 59, vol. 3, pp. 261-271, 2009.
- [7] M. d. Moel and et.al., "Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2683-2696, 2010.
- [8] R. Katzenbach and e. al., "Geothermal energy - sustainable and efficient energy supply and storage in urban areas," in *Sixth China Urban Housing Conference*, Beijing, 2007.
- [9] H. Brandl, "Energy foundations and other thermo-active ground structures," *Géotechnique* 56, vol. 2, pp. 81-122, 2006.
- [10] H. Brandl, "Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground, in deep foundations on bored and auger piles," in *5th International Symposium on Deep Foundations on Bored and Auger Piles (BAP V)*, Ghent, Belgium, 2008, pp. 77-95.
- [11] J. Marzbanrad and e. al., "Thermodynamic Optimization of GSHPS Heat Exchangers," vol. 10, pp. 107-112, 2007.
- [12] airpac. (2011, Nov.) airpac. [Online]. <http://www.airpac.eu/>
- [13] GEOenergía. (2011, Nov.) [Online]. <http://www.geoenergiasrl.eu/en/collectors.html>

- [14] D. Adam and R. Markiewicz, "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers," *Géotechnique*, vol. 59, no. 3, pp. 229-236, 2009.
- [15] L. Laloui, M. Nuth, and L. Vulliet, "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile.," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 30, no. 8, pp. 763-781, 2006.
- [16] A. Ebnother, "Energy piles. The European Experience," in *GeoDrilling 2008. Haka Gerodur*, 2008.
- [17] R. Himmler and M. N. Fisch, "International Solar Center Berlin – A comprehensive energy design," in *Fifth International Conference for Enhanced Building Operations*, Pittsburgh, Pennsylvania, 2005.
- [18] D. Pahud and M. Hubbuch, "Measured thermal performance of the energy pile system of the Dock Midfield at Zurich Airport," in *European Geothermal Congress*, Unterhaching, Germany, 2007.
- [19] M. d. M. Fernandes, *Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais*. FEUP Edições, 2006.
- [20] S. W. Rees and e. al., "Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 3, pp. 213-265, 200.
- [21] H. Esen and M. Inalli, "In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey," *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 4, pp. 395-401, 2009.
- [22] G. Florides and S. Kalogirou, "Ground heat exchangers - a review of systems, models and applications," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2461-2478, 2007.
- [23] N. Diao and e. al., "Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection.," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, no. 12, pp. 1203-1211, 2007.
- [24] H. R. Thomas and S. W. Rees, "Measured and simulated heat transfer to foundation soils.," *Géotechnique*, vol. 59, no. 4, pp. 365-375, 2009.
- [25] P. Editora. (2013,) Infopédia. [Online]. <http://www.infopedia.pt/>
- [26] E. R. Shoffel, "Agrometeorologia".
- [27] F. Kreith, R. Manglik, and M. S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, 2011th ed.

Estado Unidos da América: CENGAGE LEARNING, INC.

- [28] FLOW-3D. (2013,) FLOW-3D. [Online]. <http://www.flow3d.com/cfd-101/cfd-101-what-is-cfd.html>
- [29] N. F. d. Queiroz, "Tutorial Ansys Workbench 11.0 - Simulação com CFD de escoamento de fluxo ao redor de um edifício de 10 andares," Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- [30] I. ANSYS. (2012,) Ansys. [Online]. <http://www.ansys.com/>
- [31] I. Pointwise. (2013,) Pointwise. [Online]. <http://www.pointwise.com/pointwise/>
- [32] M. Monteiro, "Permutadores de calor ar-solo. Análise de préviabilidade," Universidade de Aveiro Tese de Mestrado, 2008.
- [33] I. Ansys, *ANSYS FLUENT Theory Guide*. Estados Unidos da América, 2011.
- [34] X. Ma and J. Grabe, "Efficiency Increase of Soil Heat Exchangers due to Graoundwater Flow and Air Injection Wells," in *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonésia, 2010, pp. 25-29.
- [35] J. M. Lapa, "Plano de Investigação e Desenvolvimento," Universidade de Aveiro, 2011.